

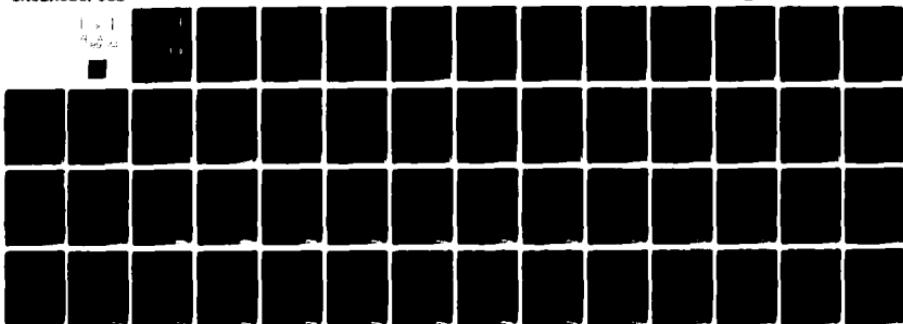
AD-A089 034

ARMY ENGINEER WATERWAYS EXPERIMENT STATION VICKSBURG MS F/G 13/13
MANUAL FOR CALCULATING SEEPAGE FORCES WHEN ESTIMATING THE STABIL--ETC(U)
JUL 76 P D YEVDOKIMOV

UNCLASSIFIED

NL

1 > 1
4 A 42



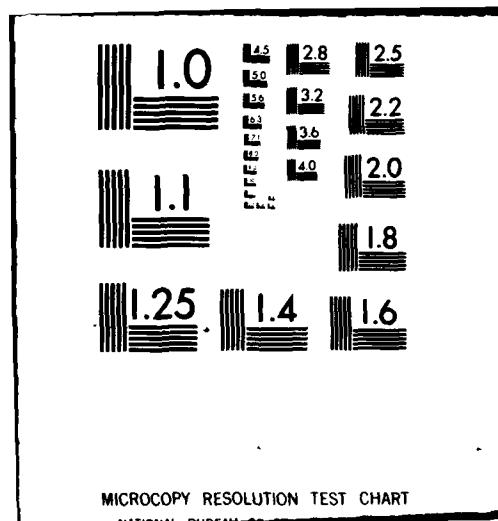
END

DATE

ITEM

10-80

DTIC

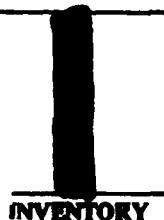


AL A 089034

DTIC ACCESSION NUMBER

PHOTOGRAPH THIS SHEET

LIBRARY BRANCH
TECHNICAL INFORMATION CENTER
US ARMY ENGINEER WATERWAYS EXPERIMENT STATION
LEVEL VICKSBURG, MISSISSIPPI



MANUAL FOR CALCULATING SEEPAGE FORCES WHEN ESTIMATING
THE STABILITY OF THE SLOPES OF EARTHEN STRUCTURES
Edited by
P. D. Yevdokimov

DOCUMENT IDENTIFICATION

DISTRIBUTION STATEMENT A

Approved for public release;
Distribution Unlimited

DISTRIBUTION STATEMENT

ACCESSION FOR	
NTIS	GRAAI
DTIC	TAB
UNANNOUNCED	
JUSTIFICATION	
BY	
DISTRIBUTION / DTIC Form 50	
AVAILABILITY CODES on file	
DIST	AVAIL AND/OR SPECIAL
A	

DISTRIBUTION STAMP

DTIC
SELECTED
SEP 12 1980
S D

DATE ACCESSIONED

80 8 28 060

DATE RECEIVED IN DTIC

PHOTOGRAPH THIS SHEET AND RETURN TO DTIC-DDA-2

TA 762
Y48

US-CE-C Property of The United States Government

45260

MANUAL FOR CALCULATING SEEPAGE FORCES WHEN ESTIMATING
THE STABILITY OF THE SLOPES OF EARTHEN STRUCTURES

Edited by
P. D. Yevdokimov

Translated from Russian for WES

by

Joint Publications Research Service

AD A 089034

July 1976

LIBRARY BRANCH
TECHNICAL INFORMATION CENTER
US ARMY ENGINEER WATERWAYS EXPERIMENT STATION
VICKSBURG, MISSISSIPPI

TA762
Y48

UDC 624.131.65:626/627

MANUAL FOR CALCULATING SEEPAGE FORCES WHEN ESTIMATING
THE STABILITY OF THE SLOPES OF EARTHEN STRUCTURES

Moscow RUKOVODSTVO PO UCHETU FIL'TRATSIONNYKH SIL PRI RASCHETAKH
USTOYCHIVOSTI OTKOSOV ZEMLYANYKH SOORUZHENIY in Russian 1975 signed to press
19 Aug 75 pp 1-23

[Manual edited by P.D. Yevdokimov, All-Union Order of the Red Banner of Labor
Scientific Research Institute of Hydraulic Engineering imeni B.Ye. Vedeneyev,
Izdatel'stvo Energiya, Leningrad, 900 copies, 23 pages]

ANNOTATION

[Text] The work is devoted to the problem of calculating seepage forces, which play a substantial role in designating the steepness of the slopes of earthen hydraulic engineering structures.

The work covers efficient methods of calculating the seepage forces when various methods are used to estimate the stability of the earthen slopes. The work also notes the shortcomings of certain procedures, often described in the literature, for calculating seepage forces.

Examples are given at the conclusion of the work of calculating the stability of earthen slopes subjected to the action of seepage forces.

78536

CONTENTS

FOREWORD

1. GENERAL CONDITIONS

- 1.1. Range of Application**
- 1.2. Accepted Designations of Basic Values**
- 1.3. Terminology**

2. GENERAL INFORMATION ON SEEPAGE FORCES

- 2.1. Types of Seepage Flows in the Embankment of Earthen Structures**
- 2.2. The Concept of Seepage Forces**

3. BASIC (INITIAL) METHODS OF CALCULATING SEEPAGE FORCES WHEN ESTIMATING THE STABILITY OF EARTH MASSES

- 3.1. First Method--Calculating Seepage Forces by Means of the Potential Function of "Resultant Forces"**
- 3.2. Second Method--The Contour Method of Calculating Seepage Forces**

4. RECOMMENDED METHODS OF CALCULATING SEEPAGE FORCES WHEN ESTIMATING THE STABILITY OF EARTH SLOPES

- 4.1. A Method of Calculating Seepage Forces Used When Estimating the Stability of Earth Slopes by the Method of Circular Cylindrical Displacement Surfaces ("Method of Theoretical Weights of the Soil")**
- 4.2. A Method of Calculating Seepage Forces Used When Estimating the Stability of Earth Slopes by the Method of Flat Displacement Surfaces**

**5. CALCULATING SEEPAGE FORCES WHEN ESTIMATING THE STABILITY OF
EARTHEN HYDRAULIC ENGINEERING STRUCTURES**

- 5.1. Calculating Seepage Forces in the Clayey Core of Rock-Earthfill Dams**
- 5.2. Calculating Seepage Forces When Estimating Rock-Earthfill Dams With Facing**
- 5.3. Calculating Seepage Forces When Estimating the Stability of a Slope on the Crest of Which a Forebay is Located**

FOREWORD

In planning earthen hydraulic engineering structures, attention must be given to solving the problem of the mechanical effect of the seepage flow on the shell of the soil. This action gives rise to seepage and weighting forces exerted by the seepage flow on the shell of the soil. These forces are mass (volumetric) forces, and it is sometimes very difficult to calculate them. At the same time, these forces, as we know, may cause piping and silting, local seepage heaving, and a general sliding of the earthen masses of soil forming, for example, the embankment of the earthen slope. It should be emphasized that it is now inadmissible to plan earthen hydraulic engineering structures without taking into consideration the seepage forces, the presence of which often causes the structure to be considerably more expensive.

In the literature the problem of seepage forces has been discussed by many authors, and a number of various methods have been suggested to calculate their forces. Among the known methods are those which are acceptable from the practical standpoint and those which at present should be regarded as insufficiently perfected, sometimes even incorrect, yielding erroneous results.

This "Manual" is devoted solely to the problem of calculating the seepage forces when estimating the overall stability of earthen slopes (problems of piping, silting and local seepage heaving are not covered below). In order to facilitate the work of designers and engineers, this "Manual" describes the appropriate, most efficient methods of calculating the seepage forces, in a form convenient for the practical use of these methods.

In conclusion let us note that among the works of the authors who have been concerned with the problem of calculating seepage forces, the fullest studies are those of R.R. Chugayev, who was the first to suggest calculating seepage forces when estimating the earthen slopes and who formulated the first theoretical method of this type [1, 2, 7, 9]. It should be noted that the "Manual," compiled in the Laboratory of Earthen Hydraulic Engineering Structures by G.A. Chugayeva, junior scientific associate, mainly summarizes the work of this author [2, 9].

USSR Ministry of
Power and
Electrification

Manual for Calculating
Seepage Forces
When Estimating the Stability
of the Slopes of Earthen
Structures

P 34-75
VNIIG

1. GENERAL CONDITIONS

1.1. Range of Application

This "Manual" applies to earthen structures of all classes of durability subject to the action of seepage flow.

This work does not discuss problems of seepage strength (normal and random) disturbed because of piping and silting of the soil, nor does it discuss problems of seepage heaving.

Discussed below are only the estimates of the so-called "general sliding" of earthen slopes, when the possibility of the earthen mass of the soil sliding is brought about mainly by the action of the soil's own weight (and of the external surface loads applied to it); the seepage forces in this case play only a supplementary role (as opposed to seepage heaving).

1.2. Customary Designations for Basic Values

θ --angle of incline of the slope to the horizon;
 m --slope coefficient;
 Z --height of the slope;
 $m \cdot Z$ --horizontal equivalent of the slope;
 I --piezometric gradient of the seepage flow at the point discussed;
 $I = -\partial H / \partial S$;
 n --porosity of the soil;
 γ_B --specific gravity of the water;

Introduced by the All-Union Order of the Red Banner of Labor Scientific Research Institute of Hydraulic Engineering imeni B.Ye. Vedeneyev

Approved by VNIIG imeni B.Ye. Vedeneyev Resolution No 32
5 May 1975 and coordinated With Glavniiiprojekt of the USSR Ministry of Power and Electrification

Introduction deadline
4th Quarter of 1975

γ_{c_yx} --volume weight of absolutely dry soil;
 γ_{c_yx} --volume weight of practically dry soil (with natural moisture content);
 γ_{a_s} --volume weight of soil suspended in water;
 γ_{Hac} --volume weight of soil saturated with water ($\gamma_{Hac} = \gamma_{c_yx} + n \cdot \gamma_0$);
 φ_a --actual angle of internal friction of the soil (value φ , corresponding to the given soil, found experimentally);
 φ_k --value of φ , at which the area of soil under discussion should be found in a state of maximum equilibrium (critical angle of internal friction);
 c_a --actual specific cohesion of the soil (value c , corresponding to the given soil);
 c_k --value c , at which the area of soil in question should be found in a state of maximum equilibrium (critical specific cohesion);
 k_s --safety factor of the stability of the section of soil in question.

1.3. Terminology

Porous embankment (soil, concrete)--an embankment consisting of a frame (solid phase) and pores, which may be filled with water and air or partly with water and partly with air. Two types of porous embankment should be distinguished: point-contact porous embankment and continuous-porous embankment.

Point-contact porous embankment--an embankment formed by solid particles, in contact with each other at mathematical points. In this case each particle of the frame is washed with liquid from all sides.

Continuous-porous embankment--an embankment obtained when solid particles are joined to each other by means of impervious contacts, with a certain area. In this case only part of the surface of the particles is exposed to the liquid; the rest is protected from the action of the liquid by impervious contacts.

Gradient of the slope--the slope tangent to the horizon, equal to $1 : m$; the "coefficient of the slope"--the value, inverse to the "gradient of the slope," equal to $m : 1$ (i.e., equal to the cotangent of the slope to the horizon).

General sliding of the earthen slope--the shifting of a large mass of soil, forming a slope, chiefly due to the forces of the soil's own weight (seepage forces play a secondary role).

Local seepage heaving of the soil--a shift of a relatively small mass of soil due chiefly to seepage forces.

2. GENERAL INFORMATION ON SEEPAGE FORCES

2.1. Types of Seepage Flows in the Embankment of Earthen Structures

Three basic types of seepage in the embankment of an earthen hydraulic engineering structure should be distinguished:

- 1) Steady seepage from the headwater to the tailwater (Fig. 1, a);
- 2) Unstable seepage arising with a change (in time) in the conditions at the borders of the seepage area (with the volume of interstitial seepage unchanged in time) [1], for example, that produced in the embankment of the slope after a reduction in the water level in the water race (Fig. 1, b);

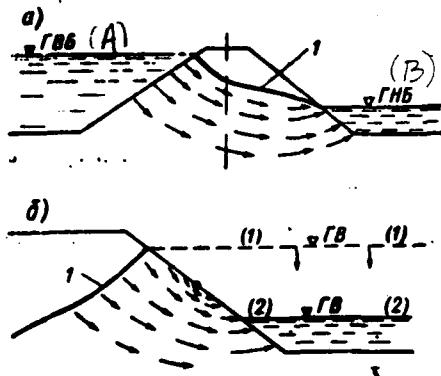


Figure 1

a--slope exposed to steady seepage; b--slope exposed to unstable seepage resulting from a rapid reduction in the water level in the water race; 1--depression curve; A--headwater level; B--tail-water level

- 3) unstable seepage, caused by the consolidation of clayey water-saturated soil (seepage caused by a change in time in the volume of interstitial seepage).

In addition, the following cases of seepage may also be distinguished:

- a) Seepage produced during the erection of an earth dam [2] (with a build-up on both sides; see Fig. 2,a);
- b) Seepage in the embankment of the slope, produced with a rainfall, when the surface of the menisci, established near the surface of the earth, "is destroyed" by the rain waters; in this case seepage is formed in the slope embankment analogous to that shown in Fig. 1, b. In Fig. 2, b, h_{Km} designates the height of the capillary rise of the water; the curves AA'B'B and BB'C--the curves of the capillary pressure occurring before the rainfall.

2.2. The concept of seepage forces

In the case of steady laminar seepage, when discussing one particle of soil, washed by water, it may be pointed out that this particle is exposed to (with

respect to the seepage flow) the forces of pressure (normally directed toward its surface) and the forces of friction (directed tangentially to its surface).

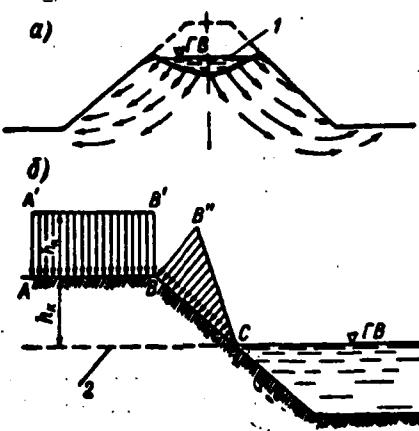


Figure 2

a--seepage flow, formed during the buildup of the dam; b--slope saturated with stationary ground water if there is a considerable height of capillary rise; 1--reservoir; 2--line of atmospheric pressure.

If \bar{f}' designates the geometrical sum of all the forces of pressure and friction exerted on one soil particle, quite a large amount, V , of the soil, consisting of a great number of particles, will be exposed (with respect to the seepage flow) to the force:

$$\phi = \sum \bar{f}', \quad (1)$$

where $\sum \bar{f}'$ is the geometric sum of the forces f' , exerted on individual particles of soil, constituting the amount of soil under discussion.

The specific force of the mechanical action of the seepage flow will be:

$$\phi = \frac{\phi}{V}. \quad (2)$$

For convenience in calculation, the specific force ϕ is customarily broken down (when discussing a planar problem) into two components. Several methods may be outlined for breaking down the force ϕ into its components [2]/Figure 3 (for an example) gives four methods of breaking down the force ϕ , where the following designations are adopted: m--the point of the seepage area under discussion; ρ --the hydrodynamic pressure; H --the head ($H = z + \frac{\rho}{\gamma_s}$, where z is the vertical coordinate of the point); N--the direction perpendicular to the lines $p=\text{const.}$; n'--the coordinate drawn along this

direction; I--the piezometric gradient at point m, being discussed; ω_N , ω_z , ω , ω_N , $(f_p)_N$, ω_x , f_p , ω_z are the various components of the specific force. The most convenient method, which we will use below, is the method shown in Fig. 3,b. According to this method the force ϕ is broken down: into the vertical component ω and the component f_p , directed along the line of flow. With this breakdown of the force ϕ it appears that its component ω turns out to be equal to Archimedes' force, i.e., the force of the weight of a solid body, which occurs in a stationary liquid. We will call this component the specific force of "hydrodynamic suspension."

The component f_p of the mechanical action of the water on the frame of the soil is customarily called the seepage force.

In the case of a point-contact porous body we have (see Fig. 3, c):

$$\omega = (1 - n) \gamma_0$$

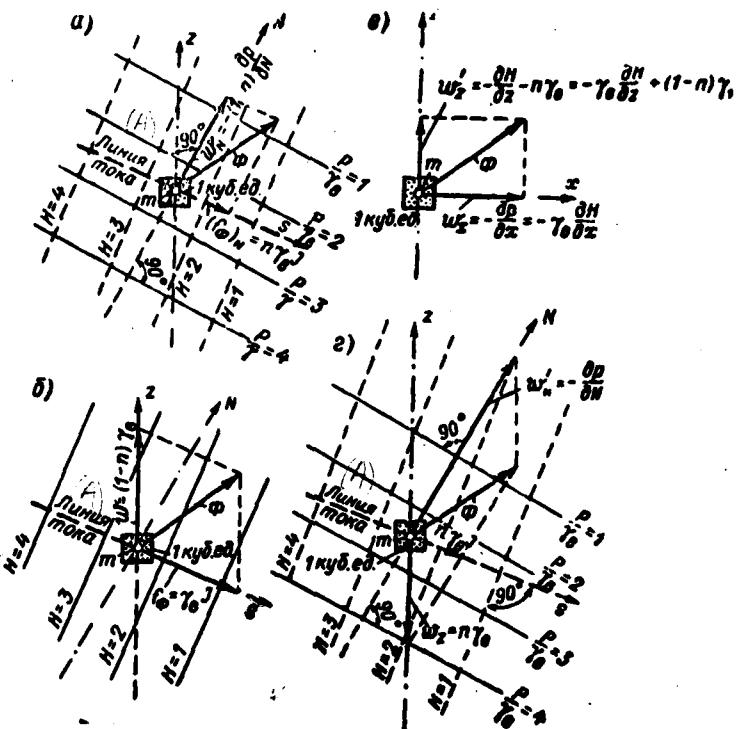


Figure 3

a-b-c-d--possible variants of the breakdown of the force ϕ into components; A--line of flow

a) The vertical component of force ϕ is:

$$\omega = (1 - n) \gamma_0 \quad (3)$$

b) The component of force f_ϕ , directed along the line of flow is:*

$$f_\phi = \gamma_0 \cdot I = -\gamma_0 \frac{\partial H}{\partial S} \quad (4)$$

where $I = -\frac{\partial H}{\partial S}$, and $\frac{\partial H}{\partial S}$ is the pressure gradient with the stable movement.**

When there is a unified-porous embankment, we have (Fig. 3,c), according to R.R. Chugayev:

a) Force

$$w = (1 - n) \gamma_0 \quad (3')$$

b) Force

$$f_\phi = \alpha \gamma_0 \cdot I_n \quad (4')$$

where α is the so-called coefficient of surface porosity of the soil.

In studying the problems of the stability and strength of earthen structures we will discuss only the point-contact soils. In this case, when making practical estimates, we will discuss the area of soil located below the curve of depression as suspended (exposed to the vertical force of hydrodynamic suspension, equal in value to Archimedes' force). In addition we will consider that a force f_ϕ (see formula 4), directed along the line of flow, is exerted on each unit of volume of the soil located in this area.

3. BASIC (INITIAL) METHODS OF CALCULATING SEEPAGE FORCES WHEN ESTIMATING THE STABILITY OF EARTH MASSES

3.1. First Method--Calculating Seepage Forces By Means of the Potential Function of "Resultant Forces"***

Acting on one unit of the volume of soil singled out within the limits of the seepage flow are three forces with the potential:

- The force of the "dry" soil's own weight;
- The force of hydrodynamic suspension w , expressed by the relationship (3);
- The seepage force f_ϕ , the magnitude of which is determined by the relationship (4). The force f_ϕ is the function of the coordinates

$$f_\phi(x, z)$$

* It should be noted that formula (4) was first published by K. Tertsagi. He did not note, however, that the second component was taken by him as vertical, because of which he permitted other authors (N.P. Puzyrevskiy and others) to point out justifiably that formula(4) is false if we assume a different direction of the second component. For details on this problem see [2].

** S is the direction outlined along the line of flow toward diminishing values of H .

*** Proposed by R.R. Chugayev in 1935.

By geometrically combining these three forces which act on the unit of volume of the soil, we obtain a single resultant force, γ_0 , exerted on the unit of soil under discussion. The resultant force γ_0 , just as its components, will have a potential which we will designate by ϕ_0 or $\phi_0(x, z)$.

N.N. Pavlovskiy [3], in discussing the pressure movement of the ground waters under concrete dams, found an expression for the potential of the volumetric resultant force γ_0 :

$$\Phi_0 = z - H + C, \quad (5)$$

where H is the pressure at a given point; z --the deepening of the given point under the plane of reference; C --the constant of integration.

Therefore, having the lines of equal pressure ($H=\text{const}$) for the seepage area under discussion, plotted, for example, by the EGDA [electrohydrodynamic analogy] method, it is possible, using the relationship (5), to plot lines of an equal value

$$\Phi_0 = \text{const}, \quad (6)$$

which give complete representation of the magnitude and direction of the resultant forces γ_0 at any point of the seepage area.

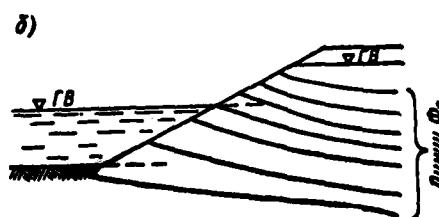
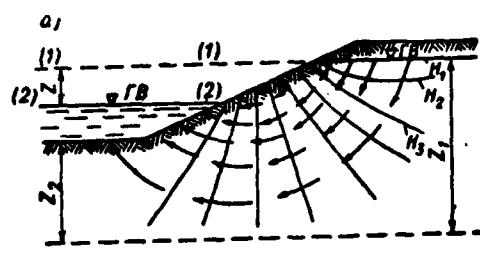


Figure 4

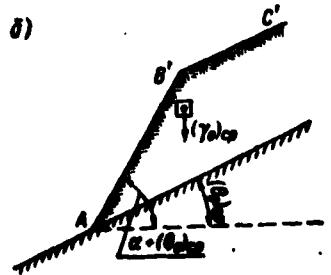
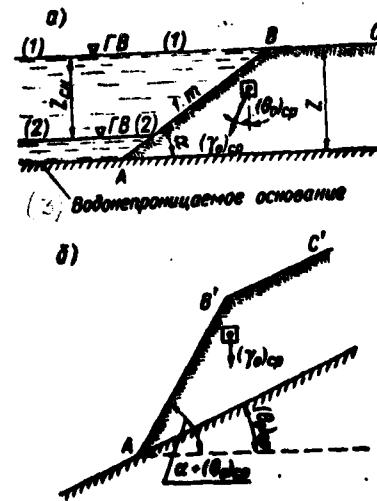


Figure 5

Key:

3. Impervious foundation

Figure 4, a, shows the earth slope for which, in accordance with the EGDA method, the lines $H=\text{const}$ were plotted for the seepage flow occurring in the slope with a rapid reduction in the water level in the water race from the level (1)-(1) to (2)-(2).

Figure 4, b, in accordance with formula (5), plots the equipotential $\phi_0 = \text{const}$. These equipotentials are somewhat corrected. According to the proposal of R.R. Chugayev, the system of the equipotential $\phi_0 = \text{const}$. obtained may be replaced by a system of straight parallel lines drawn through an equal distance from each other. By using this assumption, we obtain the slope of the earthen dam (Fig. 5,a), exposed to only one system of forces $(\gamma)_{cp}$, inclined to the vertical at a certain angle $(\theta_0)_{cp}$. In this case, to estimate the stability of the slope, one may use the "method of the slope turned at an angle of $(\theta_0)_{cp}$," proposed by R.R. Chugayev, as shown in Fig. 5,c). As can be seen, in this method the effect of the seepage forces on the stability of the earth slope is calculated by the hypothetical value of the curve of the slope at an angle of $(\theta_0)_{cp}$.

3.2. Second Method--Contour Method of Calculating Seepage Forces*

This method, suggested by A.I. Ivanov** [4], is based on replacing the volume seepage forces acting on a certain soil mass, abcd (Fig. 6, a) with a variety of surface forces of hydrodynamic pressure exerted on the contour of the volume, abcd, of the soil under discussion.***

Figure 6, c, shows two curves:

- The curve $a'b'c'd'$, obtained as the variety of pressure curves (on the contour) shown in Figure 6, a (see curves P_v' and P_v'').
- The curve $a'b'c'd'$, obtained as the variety of pressure curves on the contour, shown in Fig. 6, a (see curves P_h' and P_h'').

The area of the curve $a'b'c'd'$ gives the value of the vertical component F_v , of the total seepage force exerted on the volume of soil abcd under discussion; the area of the curve $a'b'c'd'$ represents the value of the horizontal component F_h of the total seepage force acting on the volume of soil, abcd.

When calculating F_h and F_v , as indicated above, the soil within the area of the seepage should be regarded as weighted.

* It should be noted that the name of this method ("the contour method") and the name of the "method of theoretical weights of the soil" were introduced in the literature by R.R. Chugayev [1, 2].

** This method is set forth in a somewhat different form than that given by A.I. Ivanov (see [2]).

*** In Fig. e, R is the pressure force from the frame of the soil, on the water; R_h and R_v --the horizontal and vertical projections of this force.

4. RECOMMENDED METHODS OF CALCULATING SEEPAGE FORCES WHEN ESTIMATING THE STABILITY OF EARTHEN SLOPES

4.1. Method of Calculating Seepage Forces, Used When Estimating the Stability of Earthen Slopes by the Method of Circular Cylindrical Displacement Surfaces ("Method of Theoretical Weights of the Soil")

When calculating the stability of earthen slopes by the method of circular cylindrical displacement surfaces, it is always efficient to use the so-called "method of theoretical weights of the soil." This method, in various technical formulations, was suggested by a number of authors (Kadomskiy, Ye.D., Ode, I. [5], Morgunovyy, N.M. [6] and others). A strict substantiation of this method was given on the basis of the works by R.R. Chugayev [2, 7].

According to the method of circular cylindrical surfaces of displacement, the safety factor of an arbitrarily singled out slide segment is expressed by the formula [2]:

$$k_s = \frac{\lg \gamma_A}{\lg \gamma_W} = \frac{c_A}{c_W}, \quad (7)$$

which in most cases (as applied to Tertsagi's method of weight pressure) is reduced to the form:

$$k_s = \frac{M_p}{M_a}, \quad (8)$$

where M_a is the moment of active forces; M_p --the moment of reactive forces (relative to the center of the displacement surface).

We will explain the efficient methods of determining M_p and M_a , included in formula (8).

1. Method of determining M_p . In calculating the value of M_p , we disregard the seepage forces; we calculate only Archimedes' forces of weighting. Because of this, when computing M_p , we consider the soil located above the depression curve to have a volume weight equal to the volume weight of the soil with natural moisture content; the soil below the depression curve we regard as weighted. Special studies have shown that this assumption is fully acceptable (it gives a negligible degree of error in the final results). It must, however, be noted that [7] explains an additional method, making it possible, if desired, to calculate only the vertical components of the seepage forces when calculating M_p (which makes the calculation somewhat more precise).*

2. The method of determining M_a . The value of M_a , according to this method, is determined without using any assumptions (i.e., is absolutely precise).

The following procedure is used to determine the value of M_a : a horizontal line, W-W, is drawn at the water level in the water race (see Fig. 7). This

* It can be shown that it is impossible to calculate the horizontal component of the seepage forces with the ordinary formulation of the problem in this case.

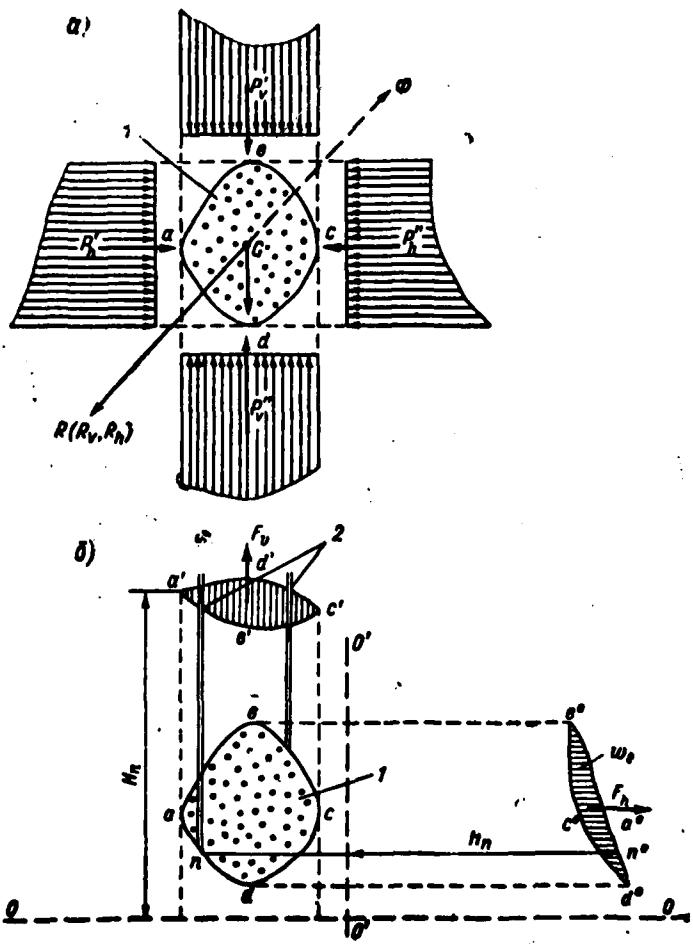


Figure 6. Plotting the Curve of the Vertical and Horizontal Components of the Seepage Force

1--soil; 2--piezometers

line and the depression curve mark the slide segment ABCWA under discussion into three parts. When determining M_a , the volume weight of the soil for these three sections is taken as different:

- a) For the part of the segment above the depression curve, the soil is considered to have natural moisture content with a volume weight of γ_{cyx} (see volume in diagrams 7,a,b,c);
- b) The soil below line W-W is considered suspended, with a volume weight γ_{ssm} , with $\gamma_{ssm} = \gamma_{cyx} - (1-n) \cdot \gamma_b$ (see volume 2 in diagrams 7,b and c).

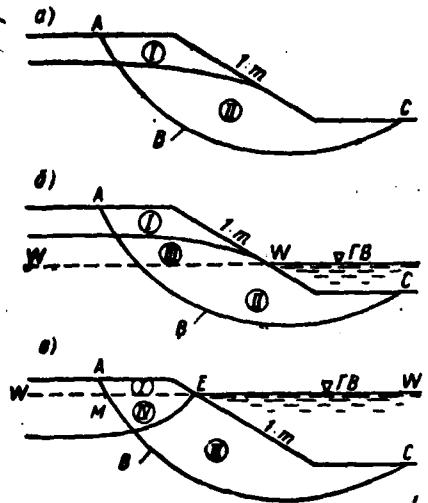


Figure 7

c) The soil between the depression curve and the horizontal W-W is regarded as saturated (if the depression curve is above the horizontal W-W), with a volume weight of γ_{mac} , with $\gamma_{mac} = \gamma'_{cyx} + \gamma_g$ (Diagram 7, b, volume 3). When the depression curve is below the horizon W-W (Diagram 7,c), it should be considered that the space MEBM (volume 4) is between the horizontal W-W and the depression curve, filled with hypothetical water, with the moment of this volume of water relative to the center O being a negative value.

The value of the safety factor is calculated by using the above values of volume weight. This method of calculating the seepage forces is used mainly when planning earthen dams.

4.2. Method of Calculating Seepage Forces Used When Estimating the Stability of Earth Slopes by the Method of Flat Displacement Surfaces

When determining the magnitude of the seepage forces acting on a slide segment, bounded from below by flat displacement surfaces, the "contour method of calculating seepage forces" is used (see section 3.2) [2].

Figure 8 shows several diagrams of slide segments exposed to seepage forces:

Diagram a--steady seepage directed toward the outside of the slope;

Diagram b--steady seepage directed within the slope;

Diagram c--irregular seepage with a sharp lowering in the water level in the water race, from level (1)-(1) to level (2)-(2);

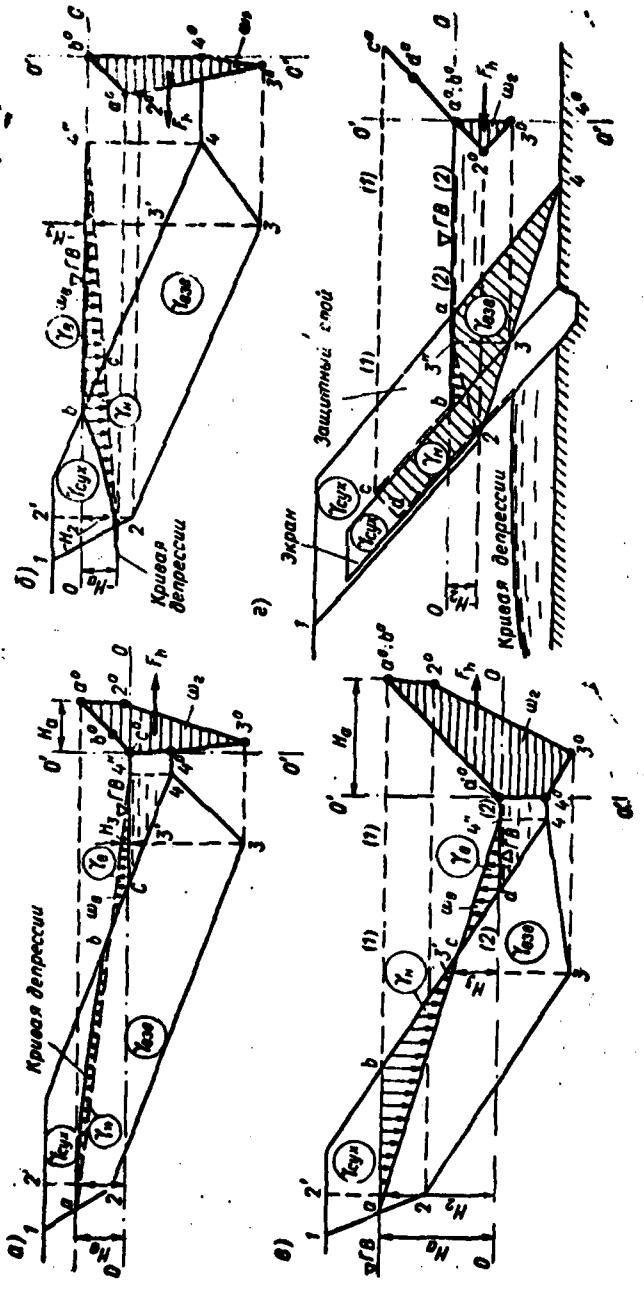


Figure 8

Key:

- 1. Curve of depression
- 2. Facing
- 3. Protective layer

Diagram d--irregular seepage with a sharp lowering of the water level in front of the facing, from level (1)-(1) to (2)-(2).

The part of the slide segment saturated with water is called the "seepage section." The seepage section of the slide segment is bounded above by the depression curve and the outer surface of the slope, and from below by the displacement surface (for diagrams 8, a,b,c). For diagram 8, d, the seepage section is bounded above by the broken line d-c-b-a-4, and from below by d-2-3-4.

We will consider the pressure for the lower limit a-2-3-4 of the seepage section of the slide segment, shown in Figure 8, a, b, c, to be distributed according to a linear principle. With the plane of reference OO, made at the level of the water horizon in the water race, the pressure at the extreme points a and 4 is respectively (for diagrams 8, a, b, c) H_a (or $-H_a$) and $H_4=0$; the straight line a-4" will be the unknown piezometric line. The pressure at points 2 and 3 of the displacement surface is determined by the segments H_2 and H_3 . For diagram 8, d, with the plane of reference OO (at the water level of the tailwater), at point 2 the pressure head is equal to H_2 , and at point 3 the pressure head is equal to 0. The straight line 2-3" is a piezometric line for section 2-3 of the shift surface. The sections of the surface 1-2 and 3-4 are characterized by zero pressure heads.

Having established the pressure heads at all the points of the seepage contour, one can determine the value of the vertical and horizontal component of force ϕ of the total hydraulic action exerted on the entire slide segment.

The vertical component ϕ_V . When estimating the stability of a slide segment, in order to calculate the vertical force ϕ_V (including the weighting and seepage forces), the weight G of each fragment singled out must be calculated on the basis of the following (sometimes conditional) volume weights of the soil:

- a) For the area of the soil which is not saturated with water, on the basis of the value of the volume weight of the "dry" soil-- γ_{dry} ;
- b) For the area of soil below the piezometric line plotted for the displacement surface (see piezometric lines a-4" in Fig. 8, a,b,c and 2-3 in Fig. 8, d)* on the basis of the value of the volume weight of the weighted soil $\gamma_{w,s}$;
- c) For the area of soil between the piezometric lines plotted for the upper section and the lower sections of the contour of the seepage part of the slide segment, on the basis of the value of the volume weight of the saturated soil -- γ'_{sat} (when the first piezometric line mentioned lies above the second piezometric line mentioned), and on the basis of the volume weight $\gamma'_{w,s} = \gamma_{dry} - \gamma_s$, when the piezometric line corresponding to the lower section of the contour is above the piezometric line corresponding to the upper section of the seepage contour.

* When this line lies below the piezometric line corresponding to the upper section of the contour.

Also to be calculated is the water's own weight in the volume included between the water level and the piezometric line plotted for the plane of the displacement (see Fig. 8, b, area $b-4''-c-b$), adding it to the weight of the corresponding fragments. If the piezometric line corresponding to the surface of the displacement lies above the water level in the water race, this overweight by water acquires a negative value (see Fig. 8, a, area $b-4''-c$; Fig. 8, c, area $c-4''-d$).

The vertical component of the seepage forces may be found by plotting the curve of the counter pressure.

The horizontal component ϕ_h . The horizontal component of the force of the hydraulic action ϕ_h should be considered equal to the horizontal component of the total seepage force. The force of the hydrodynamic weighting of the soil in the water is assumed to be vertical, and therefore it is not included in the value of ϕ_h .

$$|F_h| = |\phi_h| = \omega_r Y_B$$

where ω_r is the area of the curve, each horizontal ordinate of which is the difference in the heights of the pressure, measured at the two corresponding points (see the corresponding curves in Fig. 8).

The corresponding points mean the points lying on the same horizontal, which is a continuation of the horizontal ordinate of the curve under discussion, and the points belonging respectively to the left and right part of the contour of the seepage section of the slide segment.

The direction of the force F_h may vary; outside the slope and within it (depending on the direction of the general course of the seepage flow).

5. CALCULATING THE SEEPAGE FORCES WHEN ESTIMATING THE STABILITY OF EARTHEN HYDRAULIC ENGINEERING STRUCTURES

5.1. Calculating the Seepage Forces in the Clayey Core of Earth-Rockfill Dams

When discussing seepage through the clayey core of a dam, the following types of seepage flow are distinguished:

- 1--Steady seepage flow with a rise in the water level of the headwater;
- 2--Irregular seepage flow occurring in the core as the result of its consolidation (when there is no water in the water race);
- 3--Irregular seepage flow occurring in the core when the processes of consolidation are not yet completed, and the water level in the headwater is raised.

Figure 9 shows the lines of equal pressure in the core (rectangular core) for types 1 and 2 seepage flow.

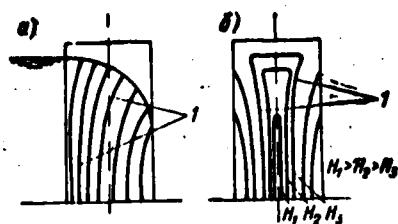


Figure 9

a--lines of equal pressure in the core with steady seepage;
b--lines of equal pressure in the core with irregular seepage
(in the process of consolidation in the core); l--lines of
equal pressure

For the third case of seepage, depending on the rate of consolidation and the system for filling the reservoir, different patterns of seepage pressures may be obtained in the core. Figure 10 shows the diagrams of possible lines of equal pressure, pertaining to the different points in time after the reservoir is filled.

Figure 10, a, pertains to the point at which the hydrodynamic pressure caused by the consolidation is great (as compared with the pressure caused by the headwater). Diagram 10, b, corresponds to the case when the pressure of consolidation is low (as compared with the pressure of the headwater). Diagram 10, c, shows the precise (general) case, in between the two.

Bearing this in mind, of the possible patterns of seepage explained above, to estimate the stability, one should select those which will give the greatest possible pressure within the core.

The seepage forces arising in the process of the seepage must be taken into consideration when estimating the stability of the downstream shell of the dam.

The stability of the downstream shell of the dam may be calculated by the method of circular cylindrical surfaces of displacement or by the method of flat surfaces of displacement [9].

We will explain the characteristics of calculating by the method of flat surfaces of shift;

We will discuss two planes of displacement:

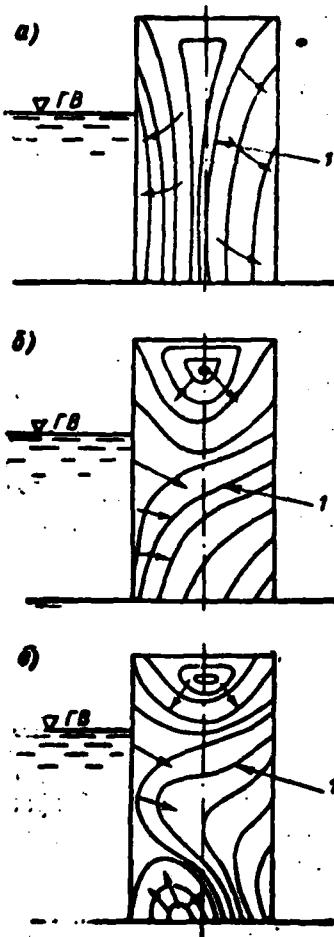


Figure 10

a-b-c--possible diagrams of the line of equal pressure in the core with irregular seepage (in the process of filling the reservoir and consolidating the core); 1--lines of equal pressure.

- 1) The displacement of the soil takes place along the broken line of the surface AdB (Fig. 11). This case is characterized by the fact that the section of the displacement surface Ad lies within the core;
- 2) The displacement of the soil and rock takes place along the surface of displacement NaB, with the surface Na lying outside the core.

In analyzing the stability of the respective segments of the soil (Add'A and d'Bd' in the first case, and Naa'N and a'aBd'a' in the second), we should:

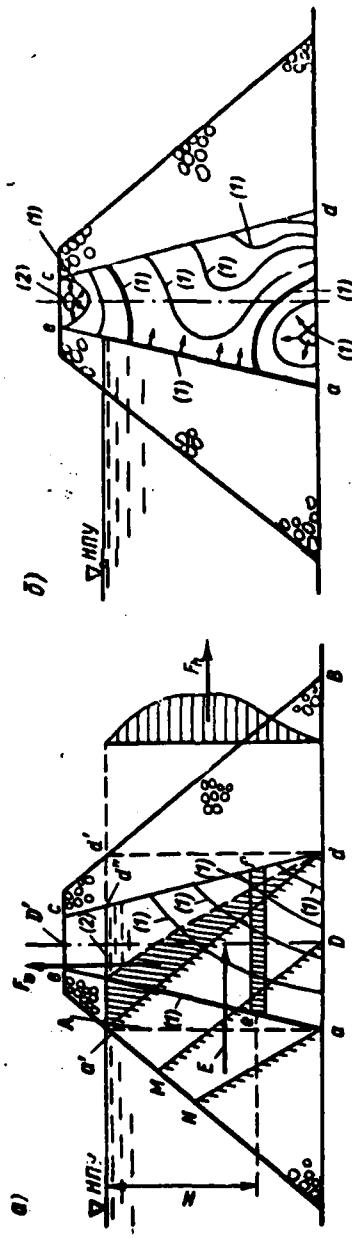


Figure 11

a—case of steady seepage; b—case of irregular seepage; abcd—core with lines of equal pressure indicated (1); ef—elementary stream of constant height; AdB, MdB, NaB—possible surfaces of shift of the soil; F_h and F_v —horizontal and vertical components of the seepage forces acting on the segment of soil $Ad'B'$; $Ad'B'$ —part of the segment $Ad'A$ with estimated volume weight of the soil equal to the volume weight of the saturated soil; (2)—estimated water level in the core.

- a) In the first case calculate the hydrodynamic pressure of the water in the interstitial space which is in effect along the surface of displacement, Ad;
- b) In the second case calculate the horizontal pressure of the water on the core, expressed by a triangle of hydrostatic pressure plotted for the depth of the water in the water race, and the vertical counter pressure exerted along the base of the core, ad (determined in accordance with the existing lines of equal pressure; here the weight of the volume, a'add'a' should be calculated on the basis of the volume weight of the saturated soil).

Note. The displacement of the segment D'DBd'D', due to the active pressure of the soil, E, falling within the boundary D'D, cannot be discussed in this case (taking into account the pressure of the water in the pores). When concerned with the stability of the segment D'DBd'D', its displacement should be discussed in conjunction with the segment D'DMAD' along the surface MDB, bearing in mind the fact that the pressure of the water in the pores along the line DD' will be an internal force, which must not be taken into consideration in the calculations.

5.2. Calculating the Seepage Forces When Estimating Rock-Earthfill Dams With a Facing.

When estimating the stability of the upper slope of dams with a facing, the case of a rapid drop in the water level in the water race should be checked. To be checked here is the possibility of a displacement along two planes:

1--The displacement of the protective layer along the facing; 2--the displacement of the facing along with the protective layer along the material of the embankment of the dam.

The calculations are made in accordance with the method of flat surfaces of displacement [9].

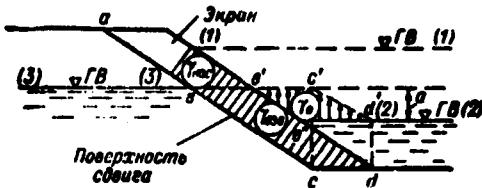


Figure 12

Key:

1. Facing

2. Surface of displacement

The theoretical diagram for the case of the facing sliding along the material of the dam embankment with a rapid reduction in the water level in the water

race is shown in Figure 8,d. See part 4, section 4.2 for the characteristics of plotting the curve of the vertical and horizontal components.

The following circumstance should also be taken into consideration in calculations for dams with a facing.

We will assume that when the water level in the water race is at the (1)-(1) level, the depression curve behind the facing takes the position (3)-(3) (Fig. 12). When there is a rapid lowering of the water level in the water race to the level (2)-(2), below the depression curve (3)-(3), along the line bc there will be a constant pressure, corresponding to the pressure at point b; along the line cd the pressure drops according to a linear principle (see the piezometric line c'd' in Fig. 12). Therefore, the pressure (counter pressure) exerted on the facing is expressed by the curve b'b'd'c'. When there are sufficiently great ordinates of the counter pressure curve obtained, the facing surfaces, and there is no point in this case of verifying the stability of the facing for a shift along the surface abcd.

5.3. Calculating the Seepage Forces When Estimating the Stability of a Slope on the Crest of Which a Forebay is Located

The stability of a slope on the crest of which a forebay is located is determined according to the method of circular cylindrical slide surfaces [9], and the safety factor is:*

$$k_3 = \frac{M_p}{M_a} = \frac{M_m + rL_s c_d}{M_a}$$

where M_m is the moment of the forces of friction (relative to the center O of the surface of shift); r is the radius of the surface of shift; L_s is the length of the arc of shift.

The moment of the forces of friction is calculated from the formula:

$$M_m = r(Q + f_{c_y x} + f_{s_{3,3}} + W') \operatorname{tg} \gamma_d$$

where Q is the sum of all the vertical forces acting on the forebay (the structure's own weight, the counter pressure; for the diagram of Figure 13,b the counterpressure is equal to zero); $f_{c_y x}$ is the weight of the dry soil above the depression curve (for diagram 13, a, $f_{c_y x} = 0$); $f_{s_{3,3}}$ is the weight of the suspended soil between the depression curve (if there is one) and the slide curve; W' is the pressing force of the blanket through the difference in the pressures of the water above and below.

The moment of shifting forces is equal to the sum of the moments of the following forces (relative to the center O of the arc of shift):

$$M_a = M_{B_B} + M_{B_{s_y x}} + M_{f_{c_y x}} + M_{f_{H_a c}}$$

* According to the method of weight pressure

where M_{B_B} is the moment of the weight of the water of the headwater in the volume bounded by the arc ab, which is the continuation of the arc of shift; $M_{B_{dry}}$ is the moment of the weight of the concrete structure (not taking into account the counter pressure); $M_{r_{cyx}}$ is the moment of the weight of the dry soil, above the depression curve (for diagram 13, b); $M_{r_{Hac}}$ is the moment of the weight of the saturated soil below the curve of the depression.

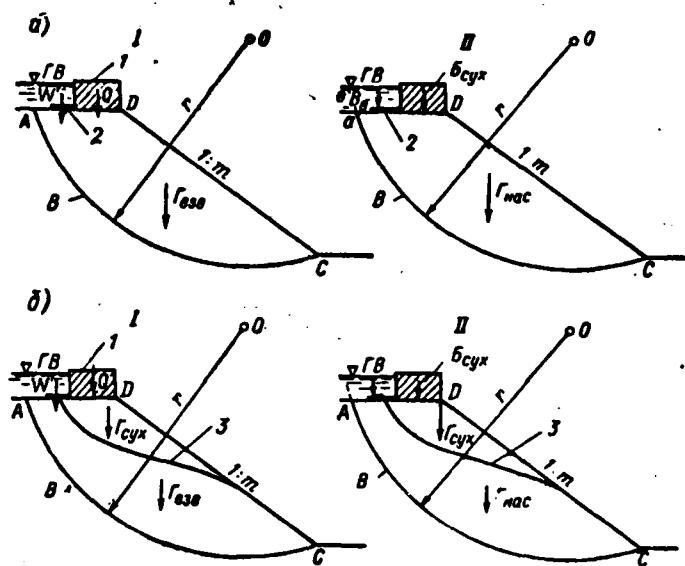


Figure 13. Calculating the Stability of a Slope on the Crest of Which a Forebay is Located

1 --forebay; 2--blanket; 3--curve of depression

MANUAL FOR CALCULATING SEEPAGE FORCES WHEN
ESTIMATING STAB OF SLOPES - - - STRUCTURES

Чердакимов
МИНИСТЕРСТВО ЭНЕРГЕТИКИ И ЭЛЕКТРИФИКАЦИИ СССР
ГЛАВНИИПРОЕКТ

ВСЕСОЮЗНЫЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ ГИДРОТЕХНИКИ
имени Б. Е. ВЕДЕНЕЕВА

Property of the United States Government

РУКОВОДСТВО
ПО УЧЕТУ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ СИЛ
ПРИ РАСЧЕТАХ УСТОЙЧИВОСТИ ОТКОСОВ
ЗЕМЛЯНЫХ СООРУЖЕНИЙ

ПЗ 4-75
ВНИИГ

LIBRARY BRANCH
TECHNICAL INFORMATION CENTER
US ARMY ENGINEER WATERWAYS EXPERIMENT STATION
VICKSBURG, MISSISSIPPI

Ленинград
1975

МИНИСТЕРСТВО ЭНЕРГЕТИКИ И ЭЛЕКТРИФИКАЦИИ СССР
ГЛАВНИИПРОЕКТ
ВСЕСОЮЗНЫЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ ГИДРОТЕХНИКИ
имени Б. Е. ВЕДЕНЕЕВА

РУКОВОДСТВО
ПО УЧЕТУ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ СИЛ
ПРИ РАСЧЕТАХ УСТОЙЧИВОСТИ ОТКОСОВ
ЗЕМЛЯНЫХ СООРУЖЕНИЙ

П 34-75
ВНИИГ

ЛЕНИНГРАД
1975

УДК 624.131.65 : 626/627

Работа посвящена вопросу учета фильтрационных сил, играющих существенную роль при назначении крутизны откосов земляных гидротехнических сооружений.

В работе освещаются рациональные приемы учета фильтрационных сил при использовании различных способов расчета устойчивости земляных откосов. Равным образом в работе отмечаются недостатки некоторых, часто описываемых в литературе приемов учета фильтрационных сил.

В заключение работы приводятся примеры расчета устойчивости земляных откосов, подверженных действию фильтрационных сил.

Р 30314-177
061 (01)-75

© Всесоюзный научно-исследовательский
институт гидротехники имени Б. Е. Веденеева
(ВНИИГ), 1975

This work dedicated to the problem of calculation of infiltration forces which play a significant role in setting a steepness of hydrotechnical earth-rock slopes.

In this work are eliminated rational methods of consideration of infiltration forces by using different methods of calculations of earth-rock slopes stability. Equally, in this work carried out shortcomings of some often used methods in practice methods of accounting of infiltration forces.

Closing part of the work includes examples of calculations of earth-rock slopes stability subjected to infiltration forces.

ПРЕДИСЛОВИЕ

При проектировании земляных гидротехнических сооружений приходится обращать внимание на решение вопроса о механическом воздействии фильтрационного потока на скелет грунта. Такое воздействие порождает возникновение фильтрационных и взвешивающих сил, приложенных со стороны фильтрационного потока к скелету грунта. Эти силы являются массовыми (объемными) силами, причем учет их иногда вызывает большие трудности. Вместе с тем такие силы, как известно, могут обуславливать возникновение супфозии и кальматажа, местного фильтрационного выпора, а также общего обрушения земляных масс грунта, образующих, например, тело земляного откоса. Следует подчеркнуть, что в настоящее время недопустимо проектировать земляные гидротехнические сооружения без учета фильтрационных сил, наличие которых часто вызывает значительное удорожание сооружения.

В литературе вопрос о фильтрационных силах рассматривался многими авторами, причем был предложен целый ряд различных способов учета этих сил. Среди известных способов имеются способы, приемлемые с практической точки зрения, и такие, которые в настоящее время следует считать недостаточно совершенными, иногда же неправильными, дающими ошибочный результат.

Предлагаемое «Руководство» посвящается только вопросу учета фильтрационных сил при расчете общей устойчивости земляных откосов (вопросы супфозии, кальматажа и местного фильтрационного выпора ниже не освещаются). С целью облегчить работу инженеров-проектировщиков, в данном «Руководстве» описываются соответствующие, наиболее рациональные способы учета фильтрационных сил в форме, удобной при практическом использовании этих способов.

В заключение отметим, что среди работ авторов, занимавшихся вопросом учета фильтрационных сил, наиболее полные исследования принадлежат Р. Р. Чугаеву, который впервые предложил учитывать фильтрационные силы при расчетах земляных откосов и разработал первый расчетный способ такого рода [1, 2, 7, 9]. Следует отметить, что «Руководство», составленное в Лаборатории земляных гидро сооружений мл. н. сотр. Г. А. Чугаевой, обобщает, главным образом, работы названного автора [2, 9].

Министерство энергетики и электрификации СССР	Руководство по учету фильтрационных сил при расчетах устойчивости откосов земляных сооружений	П 34-75 ВНИИГ
---	--	------------------

1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

1.1. Область применения

Настоящее «Руководство» относится к земляным сооружениям всех классов капитальности, подверженных действию фильтрационного потока.

В данной работе не рассматриваются вопросы фильтрационной прочности (нормальной и казуальной), нарушаемой в связи с супфозией и колыматажом грунта, равным образом не рассматриваются и вопросы фильтрационного выпора.

Ниже рассматриваются только расчеты так называемого «общего обрушения» земляных откосов, когда возможность обрушения земляных масс грунта обуславливается, в основном, действием собственного веса грунта (и приложенных к нему внешних поверхностных нагрузок); фильтрационные силы в этом случае играют только дополнительную роль (в отличие от фильтрационного выпора).

1.2. Принятые обозначения основных величин

- θ — угол наклона откоса к горизонту;
- m — коэффициент откоса; $m = \operatorname{ctg} \theta$;
- Z — высота откоса;
- $m \cdot Z$ — заложение откоса;
- I — пьезометрический уклон фильтрационного потока в рассматриваемой точке; $I = -\partial H / \partial S$;
- n — пористость грунта;
- γ_w — удельный вес воды;

Внесены Всесоюзным орденом Трудового Красного Знамени научно- исследовательским институтом гидротехники им. Б.-Е. Веденеева	Утверждено ВНИИГом им. Б. Е. Веденеева Решением № 32 от 5 мая 1975 г. и согласовано с Главнинпроектом Минэнерго СССР	Срок введения IV квартал 1975 г.
--	---	---

γ'_s — объемный вес абсолютно сухого грунта;
 γ_s — объемный вес практически сухого грунта (при наличии естественной влажности);
 γ_w — объемный вес взвешенного в воде грунта;
 γ_{ws} — объемный вес насыщенного водой грунта ($\gamma_{ws} = \gamma_s + n \cdot \gamma_w$);
 ϕ_d — действительный угол внутреннего трения грунта (значение ϕ , соответствующее данному грунту, найденное экспериментальным путем);
 ϕ_k — величина ϕ , при которой рассматриваемая область грунта должна находиться в состоянии предельного равновесия (критический угол внутреннего трения);
 c_d — действительное удельное сцепление грунта (значение c , соответствующее данному грунту);
 c_k — величина c , при которой рассматриваемая область грунта должна находиться в состоянии предельного равновесия (критическое удельное сцепление);
 k_3 — коэффициент запаса устойчивости рассматриваемого отсека грунта.

1.3. Терминология

Пористое тело (грунт, бетон) — тело, состоящее из скелета (твердой фазы) и пор, которые могут быть заполнены водой и воздухом или частично водой, частично воздухом. Следует различать две модели пористого тела: точечно-контактное пористое тело и слитно-пористое тело.

Точечно-контактное пористое тело — тело, образованное твердыми частицами, соприкасающимися друг с другом в математических точках. В этом случае каждая частица скелета омывается со всех сторон жидкостью.

Слитно-пористое тело — тело, получающееся при соединении твердых частиц друг с другом при помощи водонепроницаемых контактов, имеющих определенную площадь. В этом случае только часть поверхности частиц подвергается действию жидкости; остальная часть — защищена от действия жидкости водонепроницаемыми контактами.

Уклон откоса — тангенс угла наклона к горизонту, равный $1 : m$; «коэффициент откоса» — величина, обратная «уклону откоса», равная $m : 1$ (т. е. равная котангенсу угла наклона к горизонту).

Общее обрушение земляного откоса — сдвиг большой массы грунта, образующего откос, под действием, главным образом, сил собственного веса грунта (фильтрационные силы играют второстепенную роль).

Местный фильтрационный выпор грунта — сдвиг сравнительно небольшой массы грунта под действием, главным образом фильтрационных сил.

2. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ФИЛЬТРАЦИОННЫХ СИЛАХ

2.1. Виды фильтрационных потоков в теле земляных сооружений

Следует различать три основных вида фильтрации в теле земляного гидротехнического сооружения:

1) установившаяся фильтрация из верхнего бьефа в нижний (рис. 1, а);

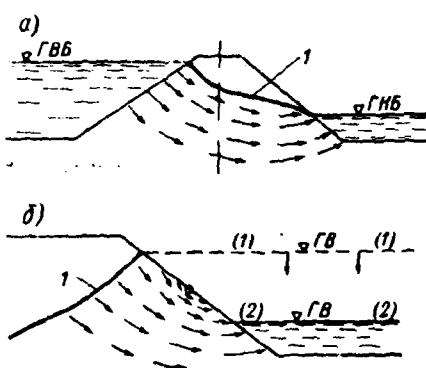


Рис. 1

а—откос, подверженный действию установившейся фильтрации; б—откос, подверженный действию неустановившейся фильтрации в результате быстрого снижения горизонта воды в бьефе; 1—кривая дисперсии.

2) неустановившаяся фильтрация, возникающая при изменении (во времени) условий на границах области фильтрации (при неизменном во времени объеме порового пространства) [1], например, получающаяся в теле откоса после снижения горизонта воды в бьефе (рис. 1, б);

3) неустановившаяся фильтрация, обусловленная консолидацией глинистого водонасыщенного грунта (фильтрация, вызванная изменением во времени объема порового пространства).

Дополнительно можно

еще различать следующие случаи фильтрации:

а) фильтрацию, получающуюся в период возведения намывной плотины [2] (при двустороннем намыве; см. рис. 2, а);

б) фильтрацию в теле откоса, получающуюся при выпадении дождя, когда поверхность менисков, устанавливающаяся вблизи поверхности земли, «разрушается» дождовыми водами; при этом в теле откоса образуется поток, аналогичный представленному на рис. 1, б. На

Рис. 2.

а—фильтрационный поток, образующийся во время намыва плотины; б—откос, изыщенный покоящейся грунтовой водой в случае значительной высоты капиллярного поднятия; 1—пруд; 2—анник атмосферного давления.

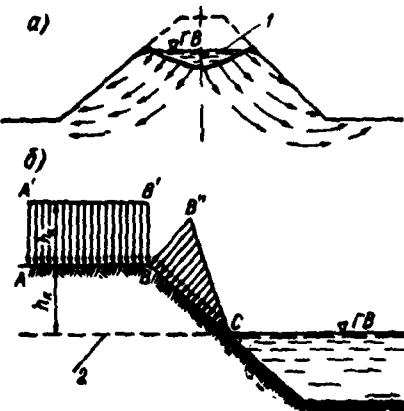


рис. 2, б через $h_{\text{кп}}$ обозначена высота капиллярного поднятия воды; эпюры $AA'B'B$ и $BB''C$ — эпюры капиллярного давления, имевшие место до выпадения дождя.

2.2. Понятие о фильтрационных силах

В случае установившейся ламинарной фильтрации, рассматривая одну частицу грунта, омываемую водой, можно показать, что эта частица подвергается действию (со стороны фильтрационного потока) сил давления (направленных нормально к ее поверхности) и сил трения (направленных касательно к ее поверхности).

Если через \bar{f}^0 обозначить геометрическую сумму всех сил давления и трения, приложенных к одной частице грунта, то достаточно большой объем V грунта, состоящий из множества частиц, будет подвергаться действию (со стороны фильтрационного потока) силы:

$$\Phi = \Sigma \bar{f}^0, \quad (1)$$

где $\Sigma \bar{f}^0$ — геометрическая сумма сил f^0 , приложенных к отдельным частицам грунта, составляющим рассматриваемый объем грунта.

Удельная сила механического воздействия фильтрационного потока будет:

$$\phi = \frac{\Phi}{V}. \quad (2)$$

Для удобства расчета уделную силу ϕ принято разлагать (при рассмотрении плоской задачи) на две составляющие. Можно наметить несколько способов разложения силы ϕ на ее составляющие [2]. На рис. 3 (для примера) представлено четыре способа разложения силы ϕ , где приняты следующие обозначения; m — рассматриваемая точка области фильтрации; p — гидродинамическое давление; H — напор ($H = z + \frac{p}{\gamma_w}$, где z — вертикальная координата точки); N — направление, нормальное к линиям $p = \text{const}$; n' — координата, намеченная вдоль этого направления; I — пьезометрический уклон в рассматриваемой точке m ; $w_N, w_{n'}, w, w'_N, (\phi)_N, w_X, f_\phi, w_2$ — различные составляющие удельной силы ϕ . Наиболее удобным способом, которым мы ниже и будем пользоваться, является способ, показанный на рис. 3, б. Согласно этому способу сила ϕ раскладывается: на вертикальную составляющую w и составляющую f_ϕ , направленную вдоль линии тока. При таком разложении силы ϕ оказывается, что ее составляющая w получается равной архимедовой силе, т. е. силе взвешивания твердого тела, которая имеет место в случае покоящейся жидкости. Этую составляющую назовем удельной силой «гидродинамического взвешивания».

Составляющую f_ϕ механического воздействия воды на скелет грунта принято называть фильтрационной силой.

В случае точечно-контактного пористого тела имеем (см. рис. 3, б):

а) вертикальная составляющая сила ϕ равна:

$$w = (1 - n) \gamma_b; \quad (3)$$

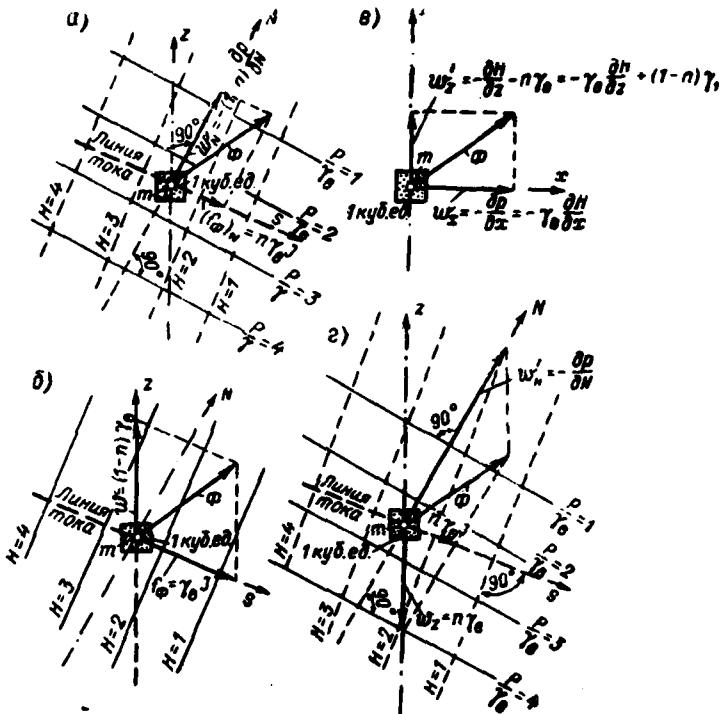


Рис. 3
а—б—в—г—возможные варианты разложения силы ϕ на составляющие.

б) составляющая силы ϕ , направленная вдоль линии тока равна:¹

$$f_\phi = \gamma_b \cdot I = -\gamma_b \frac{\partial H}{\partial S}. \quad (4)$$

где $I = -\partial H / \partial S$, причем $\partial H / \partial S$ — градиент напора при установившемся движении.²

¹ Следует отметить, что формулу (4) впервые опубликовал К. Терцаги. Однако он не отметил, что вторая составляющая принимается им вертикальной, в связи с чем он позволил другим авторам (Н. П. Пузыревскому и др.) обоснованно показать, что формула (4) является неверной, если мы примем иное направление второй составляющей. Подробно по этому вопросу см. [2].

² S — направление, намеченное вдоль линии тока в сторону уменьшающихся значений H .

При наличии слитно-пористого тела имеем (рис. 3, б), согласно Р. Р. Чугаеву:

а) сила

$$w = (z - n) \gamma_b, \quad (3')$$

б) сила

$$f_\phi = z \cdot \gamma_b \cdot I_b, \quad (4')$$

где α — так называемый коэффициент поверхностной пористости грунта.

Занимаясь вопросами устойчивости и прочности земляных сооружений, будем рассматривать только точечно-контактные грунты. В этом случае при выполнении практических расчетов обласс грунта, расположенную ниже кривой депрессии, будем рассматривать как взвешенную (подверженную действию вертикальной силы гидродинамического взвешивания, по величине равного архимедовой силе). Дополнительно будем считать, что к каждой единице объема грунта, расположенного в указанной области, приложена сила f_ϕ (см. формулу 4), направленная вдоль линии тока.

3. ОСНОВНЫЕ (ИСХОДНЫЕ) СПОСОБЫ УЧЕТА ФИЛЬТРАЦИОННЫХ СИЛ ПРИ РАСЧЕТАХ УСТОЙЧИВОСТИ ЗЕМЛЯНЫХ МАСС

3.1. Первый способ — учет фильтрационных сил при помощи потенциальной функции «результирующих сил»¹

На одну единицу объема грунта, выделенную в пределах фильтрационного потока, действуют три силы, имеющие потенциал:

- а) сила собственного веса «сухого» грунта;
- б) сила гидродинамического взвешивания w , выражаемая зависимостью (3);
- в) фильтрационная сила f_ϕ , величи-

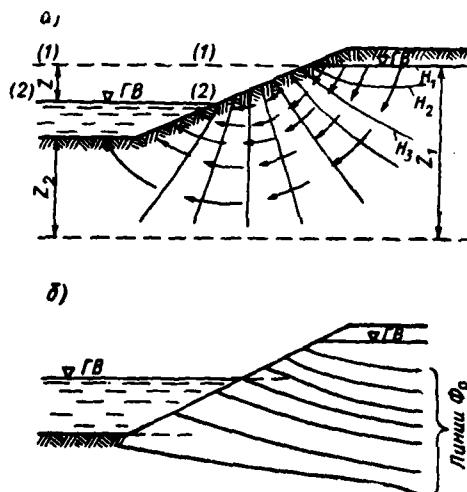


Рис. 4.

¹ Предложен Р. Р. Чугаевым в 1935 г.

на которой определяется зависимостью (4). Сила f_ϕ является функцией координат

$$f_\phi(x, z).$$

Складывая геометрически эти три силы, действующие на единицу объема грунта, получаем одну результирующую силу γ_0 , приложенную к рассматриваемой единице грунта. Результирующая сила γ_0 , так же как и ее составляющие, будет иметь потенциал, который обозначим через Φ_0 или $\Phi_0(x, z)$.



Рис. 5.

Н. Н. Павловский [3], рассматривая напорное движение грунтовых вод под бетонными плотинами, нашел выражение для потенциала объемной результирующей силы γ_0 :

$$\Phi_0 = z - H + C, \quad (5)$$

где H — напор в данной точке; z — заглубление данной точки под плоскостью сравнения; C — постоянная интегрирования.

Таким образом, имея линии равного напора ($H=\text{const}$) для рассматриваемой области фильтрации, построенные, например, по методу ЭГДА, можно, пользуясь зависимостью (5), построить линии равного значения

$$\Phi_0 = \text{const}, \quad (6)$$

которые дают полное представление о величине и направлении результирующей силы γ_0 в любой точке области фильтрации.

На рис. 4, а представлен земляной откос, для которого по методу ЭГДА построены линии $H=\text{const}$ для фильтрационного потока, возникающего в откосе при быстром снижении горизонта воды в бьефе от уровня (1)—(1) до уровня (2)—(2).

На рис. 4, б в соответствии с формулой (5) построены эквипотенциали $\Phi_0=\text{const}$. Эти эквипотенциали являются несколько исправленными. Согласно предложению Р. Р. Чугаева, полученную систему эквипотенциалей $\Phi_0=\text{const}$ представляется возможным заменить системой прямых параллельных линий, проведенных через равное расстояние друг от друга. Используя такое допущение, получаем откос земляной плотины (рис. 5, а), подверженный действию только одной системы сил $(\gamma_0)_{\text{ср}}$, наклонной к вертикали под некоторым углом $(\theta_0)_{\text{ср}}$. В таком случае для расчета устойчивости откоса может быть использован предложенный Р. Р. Чугаевым «способ поворота откоса на угол $(\theta_0)_{\text{ср}}$ », как по-

казано на рис. 5, б. Как видно, в этом способе влияние фильтрационных сил на устойчивость земляного откоса учитывается путем воображаемого увеличения крутизны откоса на угол $(\theta_0)_{ср}$.

3.2. Второй способ — контурный способ учета фильтрационных сил¹

Этот способ, предложенный А. И. Ивановым² [4], основан на замене объемных фильтрационных сил, действующих на некоторую массу грунта $abcd$ (рис. 6, а) разностью поверхностных сил гидродинамического давления, приложенных к контуру рассматриваемого объема $abcd$ грунта.³

На рис. 6, б представлены две эпюры:

- эпюра $a'b'c'd'$, получающаяся как разность эпюр давления (на контур), показанных на рис. 6, а (см. эпюры P_v' и P_v'');
- эпюра $a^0b^0c^0d^0$, получающаяся как разность эпюр давления на контур, показанных на рис. 6, а (см. эпюры P_h' и P_h'').

Площадь эпюры $a'b'c'd'$ дает значение вертикальной составляющей F_v суммарной фильтрационной силы, действующей на рассматриваемый объем грунта $abcd$; площадь эпюры $a^0b^0c^0d^0$ представляет величину горизонтальной составляющей F_h суммарной фильтрационной силы, действующей на объем грунта $abcd$.

При расчетах F_h и F_v , как указано выше, грунт в пределах области фильтрации следует считать взвешенным.

4. РЕКОМЕНДУЕМЫЕ СПОСОБЫ УЧЕТА ФИЛЬТРАЦИОННЫХ СИЛ ПРИ РАСЧЕТАХ УСТОЙЧИВОСТИ ЗЕМЛЯНЫХ ОТКОСОВ

4.1. Способ учета фильтрационных сил, используемый при расчете устойчивости земляных откосов, по методу круглоцилиндрических поверхностей сдвига («способ фиктивных весов грунта»)

При расчете устойчивости земляных откосов по методу круглоцилиндрических поверхностей сдвига всегда рационально использовать так называемый «способ фиктивных весов грунта». Этот способ в том или другом техническом оформлении предлагался рядом авторов (Кадомским Е. Д., Оде И. [5], Моргуновым Н. М. [6] и др.). Строгое обоснование этого способа приведено на основании работ Р. Р. Чугаева [2, 7].

¹ Надо заметить, что наименование данного способа («контурный способ»), а также наименование «способа фиктивных весов грунта», было введено в литературу Р. Р. Чугаевым [1, 2].

² Данный способ излагается в несколько иной форме, чем то было сделано А. И. Ивановым (см. [2]).

³ На рис. 3 R — сила давления со стороны скелета грунта на воду; R_h и R_v — горизонтальная и вертикальная проекции этой силы.

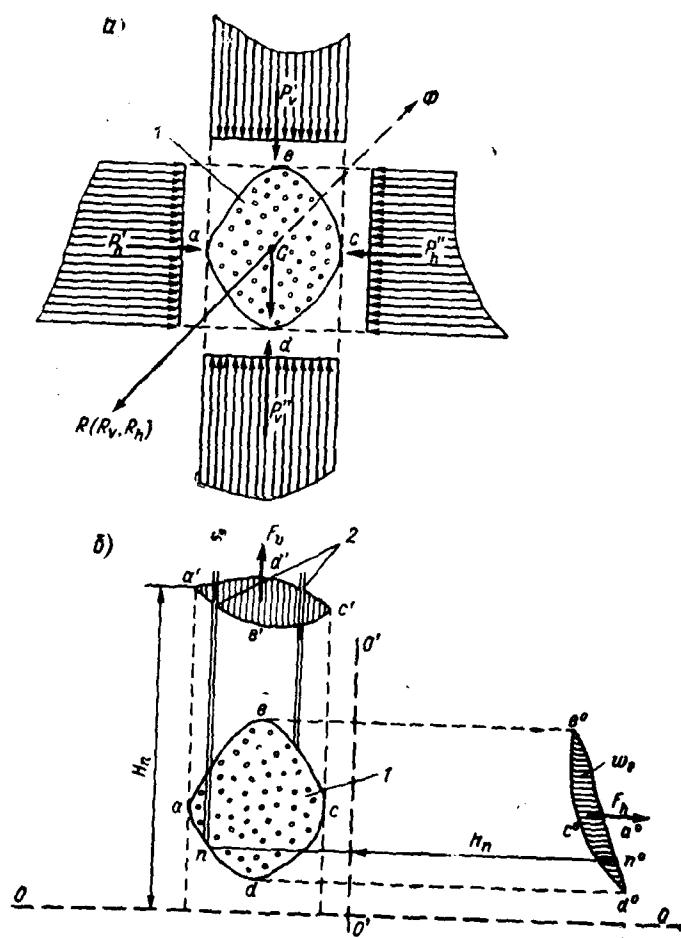


Рис. 6. Построение эпюй вертикальной и горизонтальной составляющих фильтрационной силы
1—грунт; 2—пьезометры.

Согласно методу круглоцилиндрических поверхностей обрушения коэффициент запаса произвольно выделенного отсека обрушения выражается формулой [2]:

$$k_3 = \frac{\operatorname{tg} \varphi_A}{\operatorname{tg} \varphi_K} = \frac{c_A}{c_K}, \quad (7)$$

которая в большинстве случаев (применительно к методу Терцаги, весового давления) приводится к виду:

$$k_3 = \frac{M_p}{M_a}, \quad (8)$$

где M_a — момент активных сил; M_p — момент реактивных сил (относительно центра поверхности сдвига).

Поясним рациональные способы определения M_p и M_a , входящих в формулу (8).

1. Способ определения M_p . При подсчете величины M_p пренебрегаем фильтрационными силами; учитываем только архимедовы силы взвешивания. В связи с этим, вычисляя M_p считаем, что грунт, расположенный выше кривой депрессии, имеет объемный вес, равный объемному весу грунта при естественной влажности; грунт, расположенный ниже кривой депрессии, считаем взвешенным. Специальными исследованиями было показано, что такое допущение является вполне приемлемым (оно дает ничтожную погрешность в окончательных результатах). Надо, впрочем, отметить, что в [7] освещается дополнительный способ, позволяющий, при желании, учесть только вертикальные составляющие фильтрационных сил при подсчете M_p (что несколько уточняет расчет)¹.

2. Способ определения M_a . Величина M_a согласно данному способу определяется без использования каких-либо допущений (т. е. совершенно точно).

Для определения величины M_a поступают следующим образом: на уровне горизонта воды в бьефе проводят горизонтальную

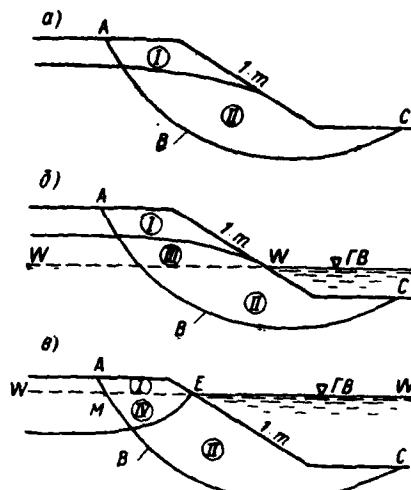


Рис. 7.

¹ Можно показать, что учет горизонтальной составляющей фильтрационных сил при обычной постановке вопроса в данном случае невозможен.

линию $W-W$ (см. рис. 7). Эта линия и кривая депрессии расчленяют рассматриваемый отсек обрушения $ABCWA$ на три части. Определяя M_a , объемные веса грунта для этих трех частей принимают различными:

а) для части отсека, расположенной выше кривой депрессии, грунт считается естественной влажности с объемным весом $\gamma_{\text{сух}}$ (см. объем I на схемах 7, а, б, в);

б) грунт, расположенный ниже линии $W-W$, считается взвешенным, с объемным весом $\gamma_{\text{взв}} = \gamma'_{\text{сух}} - (1-n) \cdot \gamma_w$ (см. объем II на схемах 7, б и в);

в) грунт, расположенный между кривой депрессии и горизонталью $W-W$, считается насыщенным (если кривая депрессии расположена выше горизонта $W-W$) с объемным весом $\gamma_{\text{нас}}$, причем $\gamma_{\text{нас}} = \gamma'_{\text{сух}} + n\gamma_w$ (схема 7, б, объем III). Для случая, когда кривая депрессии расположена ниже горизонта $W-W$ (схема 7, в), следует считать, что объем $MEBM$ (объем IV), расположенный между горизонтом $W-W$ и кривой депрессии, заполнен воображаемой водой, причем момент этого объема воды относительно центра О является величиной отрицательной.

Пользуясь вышеуказанными значениями объемного веса, подсчитывают величину коэффициента запаса. Этот способ учета фильтрационных сил, в основном, используется при проектировании земляных плотин.

4.2. Способ учета фильтрационных сил, используемый при расчете устойчивости земляных откосов по методу плоских поверхностей сдвига

При определении величины фильтрационных сил, действующих на отсек обрушения, ограниченный снизу плоскими поверхностями сдвига, используется «контурный способ учета фильтрационных сил» (см. п. 3.2) [2].

На рис. 8 представлено несколько схем отсеков обрушения, подверженных действию фильтрационных сил:

схема а — установившаяся фильтрация, направленная наружу откоса;

схема б — установившаяся фильтрация, направленная внутрь откоса;

схема в — неустановившаяся фильтрация при резком снижении горизонта воды в бьефе от уровня (1)—(1) до уровня (2)—(2);

схема г — неустановившаяся фильтрация при резком снижении горизонта воды перед экраном от уровня (1)—(1) до уровня (2)—(2).

Часть отсека обрушения, насыщенная водой, называется «фильтрующей частью». Фильтрующая часть отсека обрушения ограничена сверху кривой депрессии и наружной поверхностью откоса, снизу — поверхностью сдвига (для схем 8, а, б, в). Для

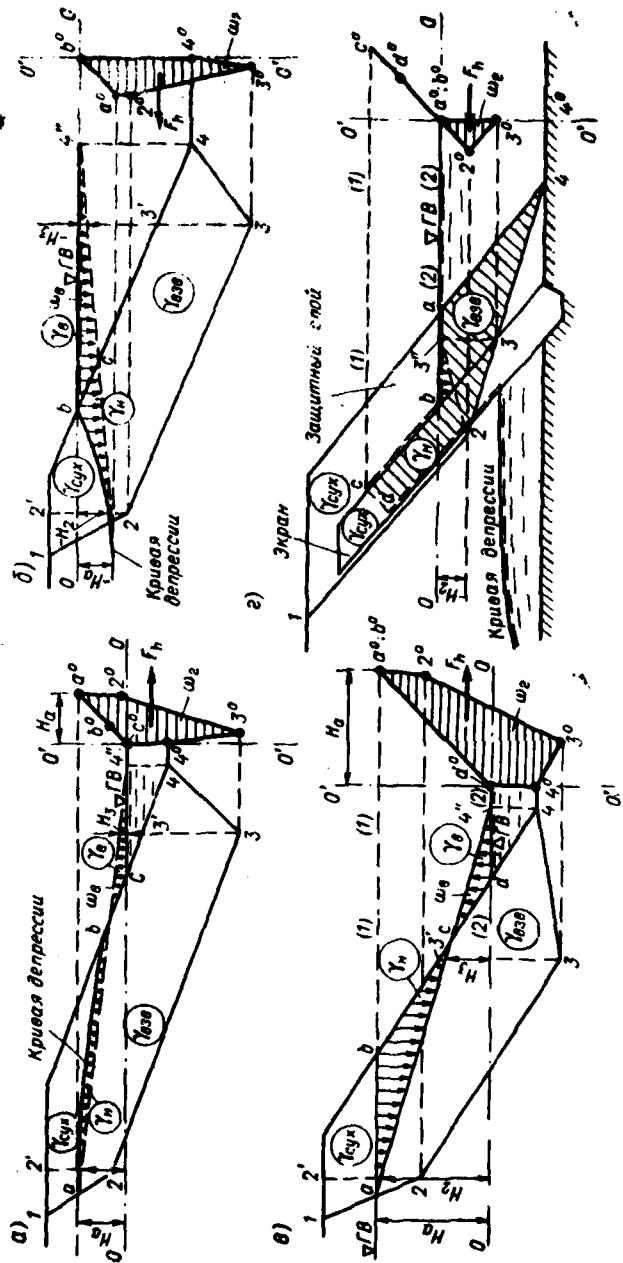


Рис. 8.

схемы 8, г фильтрующая часть сверху ограничена ломаной линией $d - c - b - a - 4$, снизу $d - 2 - 3 - 4$.

Считаем, что напор для нижней границы $a - 2 - 3 - 4$ фильтрующей части отсека обрушения, показанного на рис. 8, а, б, в, распределяется по линейному закону. При плоскости сравнения OO , проведенной на уровне горизонта воды в бьефе, напор в крайних точках a и 4 равен соответственно (для схем 8, а, б, в) H_a (или $-H_a$) и $H_4 = 0$; прямая $a - 4''$ будет искомой пьезометрической линией. Напор в точках 2 и 3 поверхности сдвига определяется отрезками H_2 и H_3 . Для схемы 8, г при плоскости сравнения OO (на уровне воды нижнего бьефа) в точке 2 напор равен $-H_2$, в точке 3 напор равен 0. Прямая $2 - 3''$ является пьезометрической линией для участка 2—3 поверхности сдвига. Участки поверхности 1—2 и 3—4 характеризуются нулевыми напорами.

Установив напоры во всех точках фильтрующего контура, можно найти величину вертикальной и горизонтальной составляющей силы Φ суммарного гидравлического воздействия, действующей на весь отсек обрушения.

Вертикальная составляющая Φ_v . С тем, чтобы при расчете устойчивости отсека обрушения учесть вертикальную силу Φ_v (включающую взвешивающую и фильтрационную силы), вес G каждого выделенного фрагмента необходимо подсчитывать, исходя из следующих (иногда условных) объемных весов грунта:

а) для области грунта, не насыщенного водой, исходя из величины объемного веса «сухого» грунта — $\gamma_{сух}$;

б) для области грунта, расположенной ниже пьезометрической линии, построенной для поверхности сдвига (см. пьезометрические линии $a - 4''$ на рис. 8, а, б, в и $2 - 3 -$ на рис. 8, г)¹, исходя из величины объемного веса взвешенного грунта — $\gamma_{взв}$;

в) для области грунта, расположенной между пьезометрическими линиями, построенными для верхнего участка и нижнего участков контура фильтрующей части отсека обрушения, исходя из величины объемного веса насыщенного грунта — $\gamma_{нас}$ (когда первая упомянутая пьезометрическая линия лежит выше второй упомянутой пьезометрической линии), и исходя из объемного веса $\gamma_{взв}^0 = \gamma_{сух} - \gamma_{взв}$, когда пьезометрическая линия, отвечающая нижнему участку контура, расположена выше пьезометрической линии, отвечающей верхнему участку фильтрующего контура.

Необходимо учитывать также собственный вес воды в объеме, заключенном между горизонтом воды и пьезометрической линией, построенной для плоскости сдвига (см. рис. 8, б, площадь $b - 4'' - c - b$), прибавляя его к весу соответствующих фрагментов. Если пьезометрическая линия, отвечающая поверхности сдвига, лежит выше горизонта воды в бьефе, то указанная при-

¹ Случай, когда эта линия лежит ниже пьезометрической линии, отвечающей верхнему участку контура.

грузка водой получает отрицательное значение (см. рис. 8, а, площадь $b - 4'' - c$; рис. 8, в, площадь $c - 4'' - d$).

Вертикальную составляющую фильтрационных сил можно находить путем построения эпюры противодавления.

Горизонтальная составляющая Φ_h . Следует считать, что горизонтальная составляющая силы гидравлического воздействия Φ_h равна горизонтальной составляющей суммарной фильтрационной силы. Сила гидродинамического взвешивания грунта в воде принимается вертикальной, и потому она не входит в величину Φ_h .

$$|F_h| = |\Phi_h| = \omega_r \gamma_w,$$

где ω_r — площадь эпюры, каждая горизонтальная ордината которой представляет собой разность высот давления, измеренных в двух соответственных точках (см. соответствующие эпюры на рис. 8).

Под соответственными точками понимаем точки, лежащие на одной и той же горизонтали, являющейся продолжением рассматриваемой горизонтальной ординаты эпюры и принадлежащие соответственно левой и правой части контура фильтрующей части отсека обрушения.

Направление силы F_h может быть различным: наружу откоса или внутрь его (в зависимости от направления общего течения фильтрационного потока).

5. УЧЕТ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ СИЛ ПРИ РАСЧЕТАХ УСТОЙЧИВОСТИ ЗЕМЛЯНЫХ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ

5.1. Учет фильтрационных сил в глинистом ядре каменно-земляных плотин

При рассмотрении фильтрации через глинистое ядро плотины различают следующие виды фильтрационного потока:

1 — установившийся фильтрационный поток при поднятом уровне воды верхнего бьефа;

2 — неустановившийся фильтрационный поток, имеющий место в ядре в результате его консолидации (при отсутствии воды в бьефе);

3 — неустановившийся фильтрационный поток, имеющий место в ядре, когда процессы консолидации еще не завершились, а уровень воды в верхнем бьефе поднят.

На рис. 9 представлены линии равного напора в ядре (ядро прямоугольное) для 1 и 2 вида фильтрационного потока.

Для 3-го случая фильтрации в зависимости от скорости консолидации и схемы наполнения водохранилища можно получить различные картины фильтрационных напоров в ядре. На рис. 10 представлены схемы возможных линий равного напора, относящиеся к различным моментам времени после заполнения водохранилища.

Схема 10, а относится к моменту, когда гидродинамическое давление, обусловленное консолидацией, велико (по сравнению с давлением, обусловленным верхним бьефом). Схема 10, б отвечает случаю, когда давление консолидации мало (по сравнению с давлением верхнего бьефа). На схеме 10, в изображен промежуточный (общий) случай.

Имея это в виду, из возможных картин фильтрации, поясненных выше, для расчета устойчивости следует выбирать те, которые будут давать возможно большие напоры внутри ядра.

Возникающие в процессе фильтрации фильтрационные силы необходимо учитывать при расчетах устойчивости низового клина плотины.

Расчет устойчивости низового клина плотины может выполняться по методу круглоцилиндрических поверхностей сдвига или по методу плоских поверхностей сдвига [9].

Поясним особенности расчета по методу плоских поверхно-

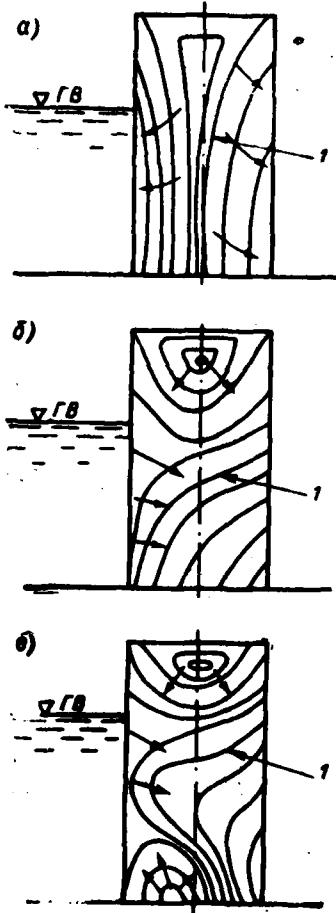


Рис. 10
а—б—с—возможные схемы линий равного напора в ядре при неуставновившейся фильтрации (в процессе заполнения водохранилища и консолидации ядра); 1—линия равного напора.

стей сдвига:

Рассмотрим две плоскости сдвига:

1) сдвиг грунта происходит по ломаной поверхности AdB (рис. 11). Этот случай характеризуется тем, что участок поверхности сдвига Ad лежит внутри ядра;

2) сдвиг грунта и камня происходит по поверхности сдвига NaB , причем поверхность Na лежит вне ядра.

Анализируя устойчивость соответствующих отсеков грунта ($Add'A$ и $d'dBd'$ в 1-ом случае и $Naa'N$ и $a'aBd'a'$ — во 2-ом случае) мы должны:

а) в 1-ом случае учитывать гидродинамическое давление воды в поровом пространстве, действующее по поверхности сдвига Ad ;

б) во 2-ом случае учитывать горизонтальное давление воды на ядро, выражаемое треугольником гидростатического давления, построенным для глубины воды в бьефе и вертикальное противодавление, действующее по подошве ядра ad (найденное в соответствии с имеющимися линиями равного напора; при этом вес объема $a'add''a'$ надлежит вычислять, исходя из объемного веса насыщенного грунта).

Примечание. Сдвиг отсека $D'DBd'D'$ под действием активного давления прутка E , приходящегося на прань $D'D$, мы в данном случае не можем рассматривать (с учетом давления воды в порах). Интересуясь устойчивостью отсека $D'DBd'D'$, следует рассматривать сдвиг его совместно с отсеком

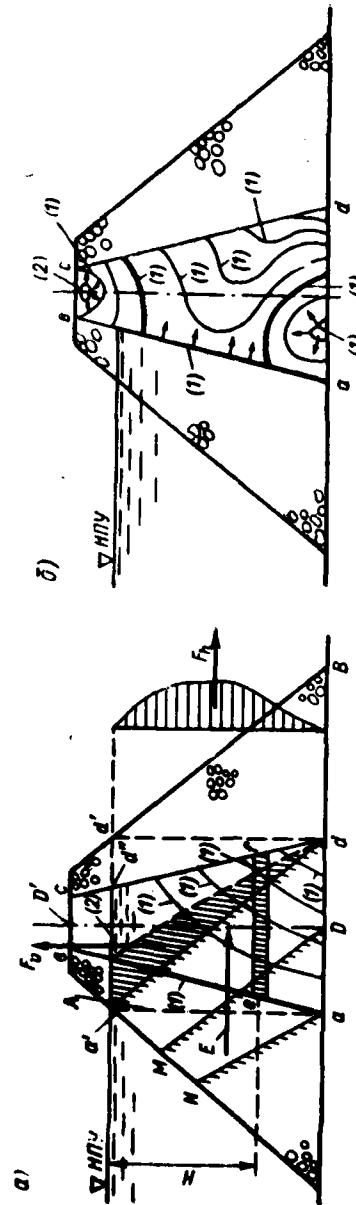


Рис. 11. К расчету устойчивости низовой каменнонабросочной призмы плотины с ядром
а—случай установившейся фильтрации; б—случай неуставившейся фильтрации: $abed$ —ядро с указанием линий (1) равного напора;
 ef —экспериментальная струя постоянной высоты; Ab , NdB , $Naa'N$ —основные поверхности сдвига грунта; F и F' —горизонтальный и вертикальная составляющие фильтрационной силы, действующей на отсек грунта $Add'A$; $Add'A$ —часть отсека $Ad'A$ с расчетным объемным весом грунта, равным объемному весу насыщенного грунта; (2)—расчетный уровень воды в ядре.

$D'DMAD'$ по поверхности MDB , имея в виду при этом, что давление воды в порах по линии DD' будет внутренней силой, которую нельзя учитывать при расчетах.

5.2. Учет фильтрационных сил при расчетах каменно-земляных плотин с экраном

При расчетах устойчивости верхового откоса плотин с экраном подлежит проверке случай быстрого снижения горизонта воды в бьефе. При этом следует проверять возможность сдвига по двум плоскостям:

1 — сдвиг защитного слоя по экрану; 2 — сдвиг экрана совместно с защитным слоем по материалу тела плотины.

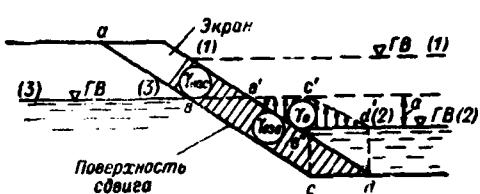


Рис. 12.

на рис. 8, г. Об особенностях построения эпюор вертикальной и горизонтальной составляющей см. в разделе IV п. 4.2.

При расчетах плотин с экраном нужно дополнительно учитывать следующее обстоятельство.

Предположим, что при горизонте воды в бьефе на уровне (1)—(1) кривая депрессии за экраном принимает положение (3)—(3) (рис. 12). При быстром снижении горизонта воды в бьефе до уровня (2)—(2), расположенного ниже кривой депрессии (3)—(3), вдоль линии bc будет иметь место постоянный напор, отвечающий напору в точке b ; вдоль линии cd напор падает по линейному закону (см. пьезометрическую линию $c'd''$ на рис. 12). Таким образом, давление (противодавление), действующее на экран, выражается эпюорой $b'b''d'c'$. В случае достаточно больших ординат полученной эпюоры противодавления произойдет всплытие экрана, причем проверка устойчивости экрана на сдвиг по поверхности $abcd$ в этих условиях не имеет смысла.

5.3. Учет фильтрационных сил при расчете устойчивости откоса, на гребне которого расположен напорный бассейн

Устойчивость откоса, на гребне которого расположен напорный бассейн, определяется согласно методу круглоцилиндрических поверхностей обрушения [9], при этом коэффициент запаса равен:¹

$$k_3 = \frac{M_p}{M_a} = \frac{M_m + rL_s c_d}{M_a},$$

где M_p — момент сил трения (относительно центра О поверхности сдвига); r — радиус поверхности сдвига; L_s — длина дуги сдвига.

¹ Согласно способу весового давления.

Расчеты проводятся согласно методу плоских поверхностей сдвига [9].

Расчетная схема для случая скольжения экрана по материалу тела плотины при быстром снижении горизонта воды в бьефе представле-

Момент сил трения вычисляется по формуле:

$$M_m = r(Q + \Gamma_{сух} + \Gamma_{вз} + W') \operatorname{tg} \varphi_d,$$

где Q — сумма всех вертикальных сил, действующих на напорный бассейн (собственный вес сооружения, противодавление; для схемы рис. 13б противодавление равно нулю); $\Gamma_{сух}$ — вес сухого грунта, расположенного выше кривой депрессии (для схемы 13, а $\Gamma_{сух}=0$); $\Gamma_{нас}$ — вес насыщенного грунта, расположенного между кривой депрессии (если она есть) и кривой обрушения; W' — сила притяжения понура разностью давлений воды сверху и снизу.

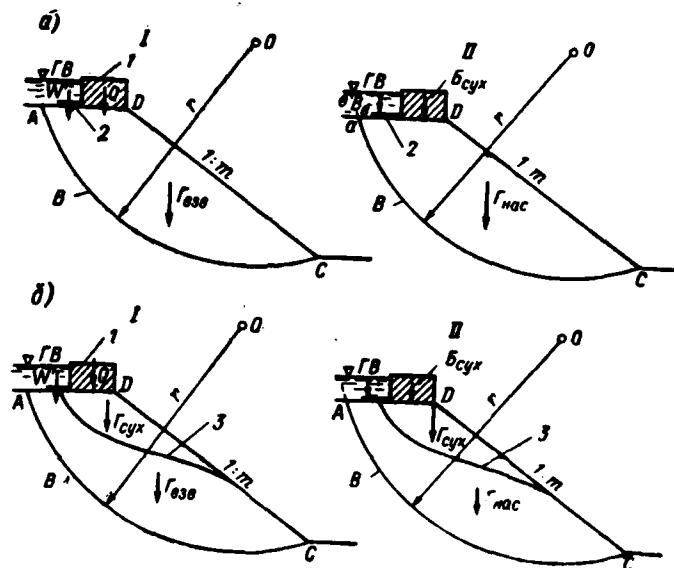


Рис. 13. К расчету устойчивости откоса, на гребне которого расположен напорный бассейн
I—напорный бассейн; 2—понур; 3—кривая депрессии.

Момент сдвигающих сил равен сумме моментов следующих сил (относительно центра О дуги сдвига):

$$M_s = M_{B_B} + M_{\Gamma_{сух}} + M_{\Gamma_{сух}} + M_{\Gamma_{нас}},$$

где M_{B_B} — момент веса воды верхнего бьефа в объеме, ограниченном дугой ab , являющейся продолжением дуги сдвига; $M_{\Gamma_{сух}}$ — момент веса бетонного сооружения (без учета противодавления); $M_{\Gamma_{сух}}$ — момент веса сухого грунта, расположенного выше кривой депрессии (для схемы 13, б); $M_{\Gamma_{нас}}$ — момент веса насыщенного грунта, расположенного ниже кривой депрессии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Chugaev R. R. Approximate determination of stability of earth dams.—The 2nd Congress on Large Dams Washington, D. C., 1936, p. 22.
2. Чугаев Р. Р. Земляные гидротехнические сооружения. «Энергия», 1967, с. 457.
3. Pavlovski N. N. The flow of ground water to canals and rivers and percolation forces arising therefrom.—XVI-th International Congress of Navigation, Brussels, 1935, Report № 8, p. 1—9.
4. Иванов А. И. О расчете устойчивости откосов и оснований земляных плотин с учетом фильтрационных сил. — «Гидротехническое строительство», 1940, № 1, с. 21—24.
5. Ohde I. Beitrag zur Berechnung der Standsicherheit von Erddämmen, Schurizerische Bauzeitung, S. 109—125, 297—299, 19/VI, 1937.
6. Моргунов Н. С. Фильтрационные силы при расчете гидротехнических сооружений на сдвиг. — «Гидротехническое строительство», 1939, № 8, с. 31—33.
7. Технические условия и нормы проектирования гидротехнических сооружений. Земляные насыпные плотины, Стройиздат, 1941, с. 151—208.
8. Устойчивость фильтрующих откосов (Материалы Всесоюзного совещания в Минске, 7—10 октября 1969 г.), Минск, 1969, с. 282.
9. Указания по расчету устойчивости земляных откосов, ВСН-04-71, Минэнерго СССР, издание второе, «Энергия», 1971, с. 102.

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	3
1. Общие положения	4
1.1. Область применения	4
1.2. Принятые обозначения основных величин	4
1.3. Терминология	5
2. Общие сведения о фильтрационных силах	6
2.1. Виды фильтрационных потоков в теле земляных сооружений	6
2.2. Понятие о фильтрационных силах	7
3. Основные (исходные) способы учета фильтрационных сил при расчетах устойчивости земляных масс	9
3.1. Первый способ — учет фильтрационных сил при помощи потенциальной функции «результатирующих сил»	9
3.2. Второй способ — контурный способ учета фильтрационных сил	11
4. Рекомендуемые способы учета фильтрационных сил при расчетах устойчивости земляных откосов	11
4.1. Способ учета фильтрационных сил, используемый при расчете устойчивости земляных откосов по методу круглоцилиндрических поверхностей сдвига («способ фиктивных весов грунта»)	11
4.2. Способ учета фильтрационных сил, используемый при расчете устойчивости земляных откосов по методу плоских поверхностей сдвига	14
5. Учет фильтрационных сил при расчетах устойчивости земляных гидroteхнических сооружений	17
5.1. Учет фильтрационных сил в глинистом ядре каменно-земляных плотин	17
5.2. Учет фильтрационных сил при расчетах каменно-земляных плотин с экраном	20
5.3. Учет фильтрационных сил при расчете устойчивости откоса, на гребне которого расположен напорный бассейн	20

**РУКОВОДСТВО ПО УЧЕТУ
ФИЛЬТРАЦИОННЫХ СИЛ
ПРИ РАСЧЕТАХ УСТОЙЧИВОСТИ
ОТКОСОВ ЗЕМЛЯНЫХ СООРУЖЕНИЙ**

**П 34-78
ВНИИГТ**

**Научный редактор П. Д. Евдокимов
Редактор А. С. Лейбович
Технический редактор Т. М. Бовичева
Ленинградское отделение
издательства «Энергия».
192041, Ленинград, Марсово поле, 1.**

Сдано в набор 23/VI 1975 г.
Подписано к печати 19/VIII 1975 г.
М-24128. Формат 60×90/16.
Бумага типографская № 1.
Печ. л. 1,5. Уч.-изд. л. 1,43.
Тираж 900. Зак. 331.

Цена 14 коп.
Типография Всесоюзного ордена
Трудового Красного Знамени
научно-исследовательского
института гидротехники
имени Б. Е. Веденеева.
196230, Ленинград, Гжатская ул., 21.

Замеченные опечатки

Страница	Строка	Напечатано	Следует читать
6	Подрисуночная подпись к рис. 1.	диспрессии	депрессии
7	Формула (2)	$\phi = \frac{\phi}{V}$	$\phi = \frac{\Phi}{V}$
8	3-я строка, сверху	вертикальная составляющая сила ϕ	вертикальная составляющая силы ϕ

Зак. 331. Руководство по учету фильтрационных сил при
расчетах устойчивости откосов земляных сооружений.

BIBLIOGRAPHY

1. Chugaev, R.R. "Approximate Determination of the Stability of Earth Dams," 2d Congress on Large Dams, Washington, D.C., 1936, p 22.
2. Chugayev, R.R. "Zemlyanyye gidrotekhnicheskiye sooruzheniya" [Earthen Hydraulic Engineering Structures], Energiya, 1967, p 457.
3. Pavlovski, N.N. "The Flow of Ground Water to Canals and Rivers and Percolation Forces Arising Therefrom," 16th International Congress of Navigation, Brussels, 1935, Report No 8, pp 1-9.
4. Ivanov, A.I. "Estimating the Stability of Slopes and Foundations of Earth Dams With Calculation of Seepage Forces," GIDROTEKHNICHESKOYE STROITEL'STVO, No 1, 1940, pp 21-24.
5. Ohde, I. "Beitrag zur Berechnung der Standsicherheit von Erddammen," SCHURIZERISCHE BAUZEITUNG, 19 June 1937, pp 109-125, 297-299.
6. Morgunov, H.S. "Seepage Forces When Estimating Hydraulic Engineering Structures for Shift," GIDROTEKHNICHESKOYE STROITEL'STVO, No 8, 1939, pp 31-33.
7. "Tekhnicheskiye usloviya i normy proyektirovaniya gidrotekhnicheskikh sooruzheniy. Zemlyanyye nasypnyye plotiny" [Technical Specifications and Norms for Planning Hydraulic Engineering Structures. Earthfill Dams], Stroyizdat, 1941, pp 151-208.
8. "The Stability of Filter Slopes" (Materialy Vsesoyuznogo soveshchaniya v Minske, 7-10 Oktyabrya 1969) [Materials of the All-Union Congress in Minsk, 7-10 October 1969], Minsk, 1969, p 282.
9. "Ukazaniya po raschetu ustoychivosti zemlyanykh otkosov" [Instructions on Calculating the Stability of Earth Slopes], VSN-04-71, USSR Ministry of Power and Electrification, 2d edition, Energiya, 1971, p 102.

12151
CSO: 9244

78536